

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

ILKKA KERÄNEN
LEIKKAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS LÄPÄISYYN JA
LEIKKAUSJÄLKEEN PEHMEIDEN AINEIDEN
VESISUIHKULEIKKAUKSESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T.
Koskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Hydrauliikan- ja automaatiotekniikan
tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 25. marraskuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

KERÄNEN, ILKKA: Leikkausparametrien vaikutus läpäisyyn ja leikkausjälkeen pehmeiden aineiden vesisuihkuleikkauksessa.

Diplomityö, 76 sivua

Heinäkuu 2010

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Leikkausparametrit, pehmeät materiaalit, vesisuihkuleikkaus

Vesisuihkuleikkaus on yksi uusimmista ja vähinten tutkituista materiaalien leikkausmenetelmistä. Vesisuihkuleikkaus on potentiaalinen ja todennäköisesti nopeasti tulevaisuudessa yleistynyt materiaalien leikkausmenetelmä. Tämä johtuu erityisesti leikkausmenetelmässä käytetyn teknologian yksinkertaisuudesta. Tässä työssä tutkitaan pehmeiden materiaalien kuten paperin ja aaltopahvin vesisuihkuleikkaamista käyttäen suhteellisen matalia leikkauspaineita ja vettä leikkaavana nesteenä. Työssä tarkastellaan myös vesisuihkun energiatiheyttä eli suihkun tehon muuttumista leikkausetäisyyden ja täten leikkaavan pinta-alan kasvaessa. Työn tavoitteena on selvittää ja osoittaa syy-seuraussuhteet leikkausparametrien muutoksien ja niillä aikaansaatuja leikkausurissa tapahtuvien muutosten välille. Lisäksi halutaan selvittää, miten nopeasti vesisuihkun teho vähenee leikkausetäisyyden kasvaessa ja miten tämä vaikuttaa leikkausjälkeen. Tutkimuksen taustalla on käytetty pääosin abrasiiveilla tapahtuvaan vesisuihkuleikkaukseen pohjautuvaa teoriaa. Keskeisimmässä osassa ovat olleet teoriat vesisuihkun säännöllisestä leviämisestä ja sillä aikaansaadun leikkausuran profiilin mallista.

Työ jakautuu kolmeen osaan. Sen ensimmäisessä osassa keskitytään vesisuihkuleikkaustekniikkaan. Tähän kuuluu vesisuihkuleikkauksen lyhyt historia, vesisuihkulla tapahtuvan leikkausprosessin tutkiminen ja leikkausuran profiilimallien esittely. Toisessa osassa keskitytään laitteistoihin, joilla tutkimuksen edellyttämät leikkauskokeet voidaan suorittaa. Toisessa osassa käsitellään myös tutkimusmenetelmiä, joita käytettiin tarvittujen mittaustulosten aikaansaamiseksi. Kolmannessa osassa keskitytään pehmeiden materiaalien leikkaustuloksien tutkimiseen. Leikkaustuloksien analysoinnissa keskitytään erityisesti leikkausurien leveyksiin ja muotoihin. Ennen loppupäätelmiä kolmannessa osassa pohditaan myös vesisuihkun energiatheyden muuttumista leikkausetäisyyttä kasvatettaessa.

Tutkimus osoittaa, että vesisuihkuleikkaus on toimiva menetelmä käytettäessä pieniä paineita ja pelkkää vettä leikkaavana väliaineena. Työssä osoitetaan ja esitellään leikkausparametrien eli leikkausetäisyyden, -nopeuden, -paineen ja suuttimen halkaisijan muutoksien aikaansaamat vaikutukset leikattaviin materiaaleihin syntyviin leikkausuriin. Erityisesti leikkausparametreistä leikkausetäisyyden oikean valinnan oleellisuuteen kiinnitetään huomiota, sillä sen vaikutus on huomattava vesisuihkun energiatheyteen.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

KERÄNEN, ILKKA: The effect of cutting parameters in water jetting of soft materials concerning width of kern and the penetration of material.

Master of Science Thesis, 76 pages

July 2010

Major: Hydraulics engineering

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: Cutting parameters, soft materials, water jet cutting

Water jet cutting is one of the newest and the least studied technologies when it comes to methods used in material cutting. Water jet cutting has potential and will likely quickly become more common as a material cutting method in the future. This is due to the simplicity of the technology it involves. In this Master of Science thesis we look into the possibilities of water jet cutting and how capable it is when it comes to cutting soft materials such as paper and cardboard. In the cutting tests we use relatively low cutting pressures and pure tap water as the cutting medium. The main objective of this Master of Science thesis is to find and prove the causes and effects between the changes made to the cutting parameters and the resulting variations measured in cut kerfs characteristics. Also, we observe how the water jet loses power as the jetting distance increases and how this affects the quality of the cut kerfs. The main literature used in this work relates to the theory involving water jet cutting enhanced with abrasive materials. The main focus is on theories that are related to the phenomenon of jet spread and to the kerf cut geometrical features.

This Master of Science thesis is divided in three parts. In the first part we focus on water jet cutting technology, comprising a history of water jetting, an analysis of the stages of the cutting process, and an introduction to different types of cut kerf models. In the second part we focus on the equipment used in the cutting experiments. The second part also includes a review of the methods that were used for obtaining the necessary research data. In the third part we study the results of the soft material cutting experiments. The main focus of the analysis is on the widths and shapes of cut kerfs. Before the conclusion we discuss how jetting distance affects water jet energy density.

This study indicates that water jetting is a feasible cutting method even when using relatively small cutting pressures and pure tap water as a cutting medium. In the thesis we point out how different variations to the cutting parameters (cutting distance, speed, pressure, and the diameter of the cutting head's orifice) affect the cut kerfs. Particular attention is paid to cutting distance, as it has a significant impact on the energy density of the water jet.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön valmistelut aloitettiin vuoden 2009 maaliskuun loppupuolella. Diplomityön aihe löytyi professori Kari T. Koskisen ideasalkusta. Työn tekemisen mahdollisti automaatio- ja hydraulitekniiikan raskaslaboratorioon Janne Pihlaisen omassa diplomityössään kehittänyt vesisuihkuleikkuri.

Kiitokset työn ohjaajalle Jussi Aaltoselle. Yleisiä käytännön ratkaisuihin tarvittuja neuvoja olen saanut Hannu Riipiseltä, Jukka-Pekka Hietalalta ja Pekka Virralta, kiitos niistä.

Kiitokset myös tekstin yleisen kieliasun tarkistamisesta ja tuesta Emmi Rintalalle.

Tampereella 17.5.2010

Ilkka Keränen

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	4
1.1. Vesisuihkutekniikan lyhyt historia	2
1.2. Abrasiivi-vedisuihkuleikkaus	3
1.3. Vesisuihkuleikkauksen hyödyt ja haitat	4
2. VESISUIHKULEIKKAUKSEN TEORIA	7
2.1. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin	7
2.2. Leikkausprosessin vaiheet	11
2.3. Leikkausuravaihtoehdot	12
2.4. Vesisuihkun ominaisuudet	16
2.5. Vesisuihkun hajoaminen ja energiatiheys	17
2.6. Teoria kiven leikkaamisesta vesisuihkulla	20
3. VESI VÄLIAINEENA JA SOVELLUSKOHTEET	21
3.1. Vesi väliaineena hydraulijärjestelmässä ja vesisuihkuleikkurissa	21
3.2. Vesisuihkuleikkaustekniikan sovellusesimerkkejä	23
4. TESTAUSYMPÄRISTÖN RAKENNE JA TOIMINTA	25
4.1. Xy-pöytä ja sen toimintaperiaate	25
4.2. Vesisuihkuleikkausjärjestelmän rakenne	26
4.2.1. Leikkaustaso ja vedenkeruuallas	27
4.2.2. Paineenmuunnin ja pääkoneikko	27
4.2.3. Leikkauspää	28
4.2.4. Leikkauksissa käytettävä vesi	28
4.2.5. Ohjauslaitteet	28
5. KÄYTETYT MITTAUSMENETELMÄT	30
5.1. Leikkauskokeiden suorittaminen	30
5.2. Leikkauskokeissa käytettävät leikkausparametrit	31
5.3. Leikattavat materiaalit	32
5.4. Leikkausuran tarkastelu mikroskoopilla	33
5.5 Vesisuihkun energiatihyden mittaaminen	34
6. MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU	36
6.1. Paperin 80g/m ² leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi	36
6.2. Paperin 112g/m ² leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi	44
6.3. Paperin 224g/m ² leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi	51

6.4. Aaltopahvin leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi	58
7. VESISUIHKUN HAJOAMINEN JA ENERGIATIHEYYS	65
7.1. Tehon tarkasteleminen	65
7.2. Leikkausuran aaltomaisuus ja materiaalin kastuminen	68
8. PÄÄTELMÄT	71
8.1 Pehmeiden materiaalien vesisuihkuleikkaaminen.....	71
8.2 Vesisuihkun energiatiheys.....	73
LÄHTEET.....	74

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Abrasiivi	Hionta-aine, joka sekoitetaan vesisuihkuun sen tehon kasvattamiseksi	
Dynaaminen paine	Vesisuihkun sisällä tarkastelu pisteestä riippuva kyseiseen kohtaan vaikuttava kappaleeseen muodostuma pinta-paine	
dSpace	Ohjelmisto, jolla voidaan luoda käyttöjärjestelmiä Matlab ja Simulink ohjelmilla toteutetuille systeemeille.	
Leikkausparametri	Leikkaukseen vaikuttava muuttuja, johon pystytään vaikuttamaan kuten esimerkiksi leikkausetäisyys	
Vesisuihkuleikkaus	Tekniikka, missä painetta hyväksi käyttäen saadaan aikaan leikkaava vesisuihku	
Xy-pöytä	Pöytä, jolla voidaan siihen asennettujen moottoreiden avulla ohjata siinä olevaa keskiötä X- ja Y-koordinaattien mukaan	
θ	Leikkausuran kaltevuuden kulma	[°]
ρ	Veden tiheys	[kg/m ³]
μ	Purkauserroin	[-]
a	Leikkauspään suuttimen sisäpuolen säde	[mm]
E	Energiavirta	[J/s]
E_{km}	Kineettinen energia	[J]
e	Vesisuihkun viiveen aiheuttama virhe	[-]
h_c	Leikkausuran konkreettinen syvyys	[-]
K	Leikkauspään kulma	[°]
m	Massa	[kg]
P	Teho	[kW]
p	Leikkauspaine	[bar]
p_m	Vesisuihkun dynaaminen paine keskiakselilla	[bar]
p₀	Paine leikkauspään kohdalla	[bar]
t_n	Materiaalin paksuus	[mm]
v	Leikkaavan vesisuihkun nopeus	[m/s]
V₀	Vesisuihkun maksimi nopeus	[m/s]
w_t	Leikkausuran ylemmän osan leveys	[mm]
w_b	Leikkausuran alemman osan leveys	[mm]
x_c	Alkuvaihealueen pituus	[-]
x	Leikkausetäisyys	[mm]
Q	Tilavuusvirta	[m ³ /s]

1. JOHDANTO

Vesisuihkuleikkauksesta on tullut monien kilpailukykyisten ominaisuuksiensa vuoksi oiva vaihtoehto muille leikkaustekniikoille. 1970-luvulta lähtien vesisuihkutekniikka on kehittynyt huomattavasti ja nyt 2000-luvulla se on noussut tasavertaiseksi kilpailijaksi lasersäteeseen perustuvien sekä mekaanisten leikkaamistekniikoiden rinnalle. Viimeisten vuosikymmenten aikana tapahtuneiden kehitysaskelien ansiosta vesisuihkuleikkaustekniikalla voidaan leikata lähes kaikkia materiaaleja ja sille löytyy monia sovelluskohteita eri aloilta kuten teollisuudesta, lääketieteestä ja rakennustekniikasta. Vesisuihkuleikkauksella voidaan valmistaa yksilöllisesti räätälöityjä ratkaisuja erilaisiin tarkoituksiin.

Vesisuihkuleikkaus on käyttökelpoinen vaihtoehto monimutkaistenkin sovellusten työstämisessä, sillä tekniikalla on mahdollista suorittaa tarkkuutta vaativia kolmiulotteisia leikkauksia. Kolmiulotteisten leikkausten tekeminen on juuri vesisuihkulla helpompi toteuttaa, sillä sen leikkauspää on kevyempi ja pienempi verrattaessa esimerkiksi laserleikkaamisessa tarvittavaan leikkauspäähän. Muita vesisuihkutekniikan etuja voidaan sanoa olevan materiaalin säilyminen viileänä leikkaustapahtuman aikana. Tämä estää kuumuuden aikaansaaman materiaalin vahingoittumisen. Siinä missä muissa leikkaustekniikoissa terärikot ovat varsin yleisiä, vesisuihkutekniikassa suuttimen vahingoittuminen on harvinaista.

Kovien materiaalien (kuten esimerkiksi teräksen ja lasin) leikkaamisessa abrasiiveilla tehostettu vesisuihkuleikkaus on vaihtoehtona muille leikkaustekniikoille. Abrasiivitekniikassa käytetään hionta-ainetta suihkun seassa sen tehon kasvattamiseksi ja leikkauspaine on näissä tapauksissa useiden tuhansien barien suuruinen. Tiedettäessä abrasiivien ja suurien paineiden avulla saatavista varmoista leikkaustuloksista onkin ymmärrettävää, että teollisuudella mielenkiinto ei riitä matalilla paineilla suoritettavien vesisuihkuleikkauksien toteuttamiseen. Tässä lienee syy sille, että tutkimustietoa ilman abrasiiveja suoritettavasta vesisuihkuleikkauksesta on varsin vaatimattomasti. Alan tutkimus liittyy pääosin juuri abrasiiveilla tapahtuvaan vesisuihkuleikkaukseen. Tutkimusintressi diplomityöhön lähti tästä asetelmasta.

Tässä diplomityössä onkin tarkoitus tutkia pelkällä vedellä tapahtuvaa leikkaamista käyttäen suhteellisen pieniä leikkausparametrien arvoja, kuten leikkauspaineena ja -nopeutena alhaisimmillaan 1000 baria ja 0,25 metriä sekunnissa, sillä aihetta ei ole tieteellisesti riittävästi kartoitettu. Leikkausparametreinä tässä työssä ovat leikkausnopeus, -etäisyys, -paine ja suuttimen halkaisijan koko. On mielekästä tutkia pystytäänkö erityisesti pienellä paineella leikkaamaan valittuja pehmeitä materiaaleja tehokkaasti, sillä pieni leikkauspaineen taso tarkoittaa alhaisempia kustannuksia. Pieni leikkauspaine on edullisempi vaihtoehto, sillä korkean paineen luomiseen tarvittavat pumput ovat huomattavasti kalliimpia kuin pienitehoiset matalapainepumput. Työssä verrataan abrasiivi-vesisuihkuleikkaukseen pohjautuvaa teoriaa pelkällä vedellä

aikaansaatuja leikkaustulosten kanssa. Pääasiassa keskitytään leikkausuran muotoon leikattaessa pehmeitä materiaaleja kuten eri neliömassaisia paperilaatuja. Tässä diplomityössä tutustutaan myös vesisuihkun luonnolliseen hajoamiseen ja tämän ilmiön vaikutuksia leikkaustehon suuruuteen käyttämällä. Apuna käytetään energiatiheyden käsitettä.

1.1. Vesisuihkutekniikan lyhyt historia

Vesisuihkuleikkaus on materiaalin työstämismenetelmänä vanha keksintö. Virtaavan veden ja sen aiheuttaman eroosion käyttömahdollisuudet oivalsivat jo antiikin kreikkalaiset. He käyttivät veden aikaansaamaa maata poistavaa ja siirtävää tekniikkaa arvokkaiden mineraaliesiintymien esiin kaivamiseen ohjailemalla maallaan virtaavia jokia haluamaansa suuntaan. 1900-luvun vaihteessa painevesisuihkutekniikkaa kehitettiin Yhdysvalloissa helpottamaan kullankaivajien työtä. Kullankaivajia varten kehitettiin laitteita, joiden aikaansaaman vesisuihkun avulla saatiin huuhdottua kultaa esiin maa-aineksen seasta. Näiden kaivostyökoneiden keksimistä voidaan pitää siirtymisenä modernin vesisuihkutekniikan ajaksi. Kaivostyöläisten työ muuttui tehokkaammaksi sekä turvallisemmaksi näiden kaivostyövälineiden keksimisen jälkeen, sillä suihkutettavan veden ansiosta ilma säilyi kaivoksissa puhtaampana. (Summers 1995, s.13)

1960-luvun loppupuolella Michiganissa Yhdysvalloissa Professori Robert Franz ja hänen oppilaansa tutkivat vesisuihkulla leikkaamista. He tulivat siihen lopputulokseen tutkimuksiensa kanssa, että leikatessa puuta suhteellisen korkeilla leikkausnopeuksilla vesisuihkulla saadaan aikaan vain pientä ylimääräistä vahinkoa leikattavaan materiaaliin. Saatujen tulosten innoittamana kehitettiin vesisuihkuleikkurin prototyyppi erilaisten materiaalien leikkaamiseen. Prototyypin valmisti vuonna 1972 yritys nimeltä Alton Boxboard. Se toimi innoittaja vesisuihkuleikkaamisen laajempaan soveltamiseen tuotantotekniikan alalla. (Summers 1995, s.8)

2000-luvulla vesisuihkuleikkaustekniikkaa sovelletaan usealla eri alalla, sillä se on tekniikkana kehittynyt valtavasti. Nykyään laadukkailla suuttimilla, korkeilla leikkauspaineilla ja nopeuksilla sekä tarvittaessa abrasiiveja käyttäen, voidaan vesisuihkuleikkureilla leikata lähes kaikenlaisia ja paksuisia materiaaleja. Myös esimerkiksi kolmiulotteisten metalliosien työstäminen on mahdollista. Harvoja materiaaleja, joita ei voida leikata, ovat lujitettu lasi ja eräät keraamiset materiaalit. Pelkällä vedellä toimivan ja abrasiiveja hyödyntävän vesisuihkutekniikan lisäksi on olemassa myös iskutekniikalla (percussive water jet), kavitaatio tekniikalla (cavitation jet) ja hybriditekniikalla toimivia vesisuihkuleikkureita. Tämän monipuolisen kehityksen ansiosta kyseistä tekniikkaa pystytään soveltamaan esimerkiksi lääketieteessä, tuotantotekniikassa ja rakennustekniikassa. Työn luvussa 3.5 tutustutaan vesisuihkutekniikan sovelluskohteisiin. Suurimpana syynä vesisuihkuleikkaustekniikan verrattain vähäiseen levinneisyyteen ja käyttöönottoon lienee oletus sen korkeista

hankinta- ja käyttökustannuksista. Tulevina vuosina on hyvin todennäköistä, että vedellä leikkaaminen yleistyy huomattavasti.

1.2. Abrasiivi-vesisuihkuleikkaus

Vesisuihkuleikkaus voidaan toteuttaa käyttämällä leikkaavana väliaineena pelkkää vettä tai vettä johon sekoitetaan abrasiivia. Abrasiivi tarkoittaa erittäin hienorakenteista hionta-ainetta, jota lisättäessä vesisuihkun tehokkuus moninkertaistuu. Abrasiivi sekoitetaan vesisuihkuun yleensä vasta leikkauspäässä, sillä abrasiivin lisääminen vesisuihkuleikkuriin aikaisemmassa vaiheessa kuluttaisi tarpeettomasti laitteen komponentteja. Leikkauspään kyljessä sijaitsevasta abrasiivisäiliöstä suihkuun sekoittuu hionta-ainetta. Pelkkää vettä käyttävät leikkurit eivät aina sovellu suoraan toimiviksi abrasiivia sisältävän veden kanssa, mutta tämä on välillä mahdollista toteuttaa lisäosilla. Vesisuihkuleikkurin leikkauspää suunnitellaan jo alusta asti sopivaksi abrasiivin kanssa käytettäväksi. Tämä suunnittelu tulee esille muun muassa abrasiivisäiliölle jätetystä kiinnitysreistä, joka voi sijaita vesisuihkuleikkurin ohjauspään kyljessä.

Abrasiivi-vesisuihkuleikkausta käytetään usein haastavien materiaalien leikkaamiseen. Niin sanottuja haastavia materiaaleja ovat esimerkiksi keramiikka ja marmori sekä monikerroksiset komposiitit. Wang (2003) Momberin ja Kovacevicin (1998) mukaan käytettäessä abrasiivia painevesisuihkun tehokkuuden parantamiseen, on veden osa pääasiassa toimia pelkästään abrasiivin kiihdyttäjänä, jolloin abrasiivin tehtäväksi jää materiaalin leikkaaminen (Liu 2004, s. 5).

Abrasiivi-vesisuihkuleikkurin erot verrattaessa normaaliin vesisuihkuleikkuriin (pelkällä vedellä toimivaan) tulevat esille sen tehokkaammassa leikkausvoimassa. Tällaisella menetelmällä voidaan leikata esimerkiksi terästä, kuparia, alumiinia, lasia ja erilaisia kivilaatuja. Ilman abrasiiveja tapahtuva vesisuihkuleikkaus on hyvin monikäyttöinen leikkausmenetelmä, mutta tällä tekniikalla esimerkiksi paksujen ja kovien materiaalien leikkaaminen on taloudellisesti kannattamatonta. (Ultracut) Pelkällä vedellä toimivalla vesisuihkuleikkurilla on mahdollista leikata haastavia materiaaleja kuten eri kivilajikkeita, mutta leikkausprosessi kestää huomattavasti kauemmin kuin vastaava leikkaus toteutettuna abrasiivia käyttäen. Abrasiivi kerääntyy leikkaustapahtuman jälkeen vedenkeruualtaaseen ja sen poistamiseen veden mukana tulee kiinnittää erityistä huomiota. Tässä tapauksessa voidaan miettiä pitääkö abrasiivi kierrättää vai halutaanko se hävittää leikkausveden mukana.

Pinnanlaadulla ja työstön tarkkuudella on pientä eroa verrattaessa näitä kahta vesisuihkutekniikkaa. Numeerisella ohjauksella ja suhteellisen kapealla (0,1 - 0,8 millimetrin) leikkausuralla voidaan saavuttaa 0,05 - 0,15 millimetrin leikkaustarkkuus. Tyypillinen ero leikkaustarkkuudessa näiden kahden vaihtoehdon välillä on hyvin pieni. Pelkällä vesisuihkulla työستettäessä leikkaustarkkuus on luokkaa 0,1 - 0,2 millimetriä ja vastaava abrasiiveja hyödyntävällä vesisuihkuleikkauksella aikaan saatu leikkaustarkkuus on +/- 0,2 millimetriä. Materiaali vaikuttaa siihen jäävän leikkausuran pinnanlaatuun. Kumimateriaaleihin jäävä leikkausura muistuttaakin usein veitsellä

leikattua ja haurailta materiaaleilla lohkeaminen ja murtuminen leikkauspinnassa aiheuttaa leikkauspinnan karhentumista. (Prolaser)

1.3. Vesisuihkuleikkauksen hyödyt ja haitat

Vesisuihkuleikkaustekniikan hyödyntäminen on tietyillä osa-alueilla taloudellista, sillä sen avulla voidaan saavuttaa muun muassa säästöjä tuotantolinjan eri vaiheissa. Yritykset, joiden toiminta perustuu vesisuihkuleikkaustekniikkaan, mainostavat sen olevan, muiden hyvien ominaisuuksiensa ohessa, ennen kaikkea taloudellista. Tämä perustuu siihen, että materiaalien työstämiseen kuuluvissa eri työvaiheissa voidaan saavuttaa säästöjä esimerkiksi koneistuksessa sekä käsiteltäessä pölyäviä ja palaessaan voimakkaasti haisevia materiaaleja. Alle on koottu esimerkiksi Prolaser-yrityksen vesisuihkuleikkaus-tekniikalle luettelemia taloudellisuuteen perustuvia hyötyjä.

Olematon jälkityön määrä tekee vesisuihkuleikkauksesta taloudellista. Tämä tulee parhaiten esille työstettäessä sellaisia materiaaleja, joissa perinteisillä työtavoilla jouduttaisiin käyttämään suuria työstövaroja, paljon jälkityöstöä, toisistaan poikkeavia työstömenetelmiä tai pitkää valmistuksen läpimenoaikaa. Mitä enemmän työvaiheita ja niihin kuluva aikaa pitää tuotteiden valmistamiseen käyttää sitä epätaloudellisemmaksi toiminta muuttuu. Vesisuihkuleikkauksella voidaan korvata useita työvaiheita. Tyypillisesti vesisuihkuleikattava kappale on valmistettu aiemmin plasma- tai polttoleikkaamalla. Taloudellinen etu saavutetaan korvaamalla nämä kaksi menetelmää yhdellä ainoalla korvaavalla työstömenetelmällä. (Prolaser)

Käytettäessä vesisuihkutekniikkaa saadaan myös koneistusta helpotettua, sillä lämpövyöhykettä ei tarvitse huomioida työstövaroihin. Leikattavat materiaalit eivät lämpölaajene vesisuihkuleikkauksen aikana ja mitoitus- ja vaikeasti koneistettavat muodot voidaan valmistaa lähelle lopullisia haluttuja tarkkoja arvoja. (Prolaser)

Vesisuihkuleikkauksella on helppo toteuttaa leikkaukset, joissa muilla työstömenetelmillä materiaali tuottaisi työympäristön kannalta palaessaan tai sulaessaan myrkyllisiä kaasuja. Tämän lisäksi myös sahattaessa tai hiottaessa pölyävät materiaalit ovat käytännöllisempiä vesisuihkuleikkaukselle, sillä vesi sitoo materiaaleista irtoavia hiukkasia. Työntekijöille sekä koneille koneistus- ja hiontatöissä on haitallista mahdollinen työstön aikana materiaalista irronnut lasi- ja hiilikuituinen pöly. (Prolaser)

Kurkioja on opinnäytetyössään maininnut muun muassa vesisuihkuleikkauksen hyötyjä paperinleikkauksessa sekä mekaanisen leikkauksen etuja verrattuna vesisuihkuleikkaukseen. (Kurkioja 2007, s.41)

Vesisuihkuleikkauksen hyötyjä verrattaessa mekaaniseen leikkaukseen ovat seuraavat:

- parempi ja tasalaatuisempi leikkausreuna. Ohut ja ”terävä” suihku tekee puhtaan leikkuujäljen
- mahdollisuus suurempiin nopeuksiin
- pölyn muodostuminen vähäisempää

- ohuen paperin leikkaaminen lähes ongelmattomasti (paperi ei saa kostua liikaa korkeita leikkausnopeuksia käytettäessä)
- ei ongelmia teräasetusten kanssa
- mahdollisuus useampien materiaalien leikkaukseen

Mekaanisenleikkauksen edut vesisuihkuleikkaukseen verrattuna ovat seuraavat:

- pienemmät hankintakustannukset
- asennustilan tarve huomattavasti pienempi
- ei veden kierrättämisongelmia
- tutkitumpi teknologia
- tunnetumpi
- vesisuihkuleikkauksessa vaarana leikattavan materiaalin kostuminen

Seuraaviin kahteen luetteloon on kerätty vesisuihkuleikkauksen hyödyt verrattuna laserleikkaukseen ja laserleikkaamisen edut verrattaessa vesisuihkuleikkaamiseen. (Teskolaser)

Vesisuihkuleikkauksen hyötyjä verrattaessa laserleikkaukseen ovat seuraavat:

- Työskentelypiste ja pumppu/tehonlähde voivat sijoittua fyysisesti eri paikkoihin
- Kolmiulotteisten materiaalien työstäminen helpompaa sillä vesisuihkua on helpompi käsitellä kuin lasersädettä
- Mahdollista leikata kerrostettuja materiaaleja, joilla on eri sulamispiste. Vaarana kerrosten toisistaan irtoaminen
- Taloudellisempaa leikata paksumpia materiaaleja
- Leikkausjäljessä ei ole palamisesta aiheutuvia haittoja

Laserleikkauksen edut verrattaessa vesisuihkuleikkaukseen ovat seuraavat:

- Mahdollisuus myös kappaleiden toisiinsa kiinni hitsaamiseen
- Saa aikaan kapeamman leikkausuran
- Parempi leikkausjäljen toleranssi
- Ei tuota melua
- Koneisto ei likastu työstön aikana

Kuten aikaisemmista luetteloista nähdään, ei vesisuihkuleikkaus pysty täysin leikkaustekniikkana korvaamaan esimerkiksi laserleikkaustekniikkaa. Vesisuihkuleikkauksella ei esimerkiksi pystytä saavuttamaan yhtä tarkkoja leikkauspinnan toleransseja kuin laserilla leikkaamalla. Toisaalta on tilanteita, joissa vesisuihkuleikkaustekniikka on käytännöllisempi vaihtoehto kuin mekaaninen ja

laserleikkaus. Vesisuihkuleikkaaminen ei aiheuta ilman laatua pilaavaa pölyä, kuten mekaaninen leikkaus ja aikaan saadussa leikkausurassa ei ole koskaan palamisesta aiheutuvia haittoja.

2. VESISUIHKULEIKKAUKSEN TEORIA

Leikkauspaineen ja veden nopeuden tulee olla huomattavan suuria vesisuihkuleikkauksessa. Tarvittavan paineen ja nopeuden aikaansaamiseksi käytetään pumppua. Pumpun aikaansaamalla paineella on kaksi tehtävää: saada vesi kulkemaan putkiston läpi suuttimelle asti sekä saada vesi purkautumaan vesisuihkun muodostavasta suuttimesta eteenpäin tarvittavalla nopeudella. (Summers 1995, s.4)

2.1. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin

Vesisuihkuleikkauksessa käytettävään leikkausnopeuteen vaikuttaa muun muassa seuraavat tekijät: materiaalin paksuus, suuttimen halkaisija, paine ja haluttu leikkausjäljen laatu. (KMT 2005, s.13) Seuraavissa kappaleissa keskitytään tarkastelemaan, miten nämä tekijät vaikuttavat leikkausnopeuden suuruuteen.

Valitun leikkausnopeuden suuruus on suhteessa leikattavan materiaalin paksuuteen. Kun materiaalin paksuus puolittuu, voidaan käyttää alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna yli kaksinkertaista leikkausnopeutta. (KMT 2005, s.13) Leikkauskokeiden avulla nähdään, miten vesisuihkun leikkausnopeus vaikuttaa aikaan saadun uran syvyyteen. Leikkausnopeuden vaikutusta leikkausuran syvyyteen on tutkittu vesisuihkuleikkaamalla muun muassa betonia. Käytettäessä 4130 barin leikkauspainetta ja leikkausnopeutta 2,5 metriä sekunnissa 25-75 millimetriä syvän leikkausuran aikaansaamiseksi, todettiin tutkimuksessa, että vaadittua uran syvyyttä ei saatu aikaan. Leikkausnopeus pudotettaessa kymmenesosaan alkuperäisestä, saatiin aikaan hyväksyttävä uran syvyys. (Summers 1995, s.310)

Suuttimen halkaisijaa pienentämällä muodostuu suurempi vesisuihkun nopeus. Pienemmän koon suuttimella saadaan aikaan suurempi energiatiheys, mikä mahdollistaa nopeamman leikkausnopeuden käytön. Kun suuttimen halkaisija kasvatetaan kaksinkertaiseksi, se pystyy kuljettamaan nelinkertaisen määrän paineistettua vettä. Nopeuden kasvu on kuitenkin vain 80 prosenttia. Tämän takia on usein järkevämpää käyttää useita pienempiä suuttimia, joita kuljetetaan saman leikkauslinjan mukaisesti. (KMT 2005, s.13)

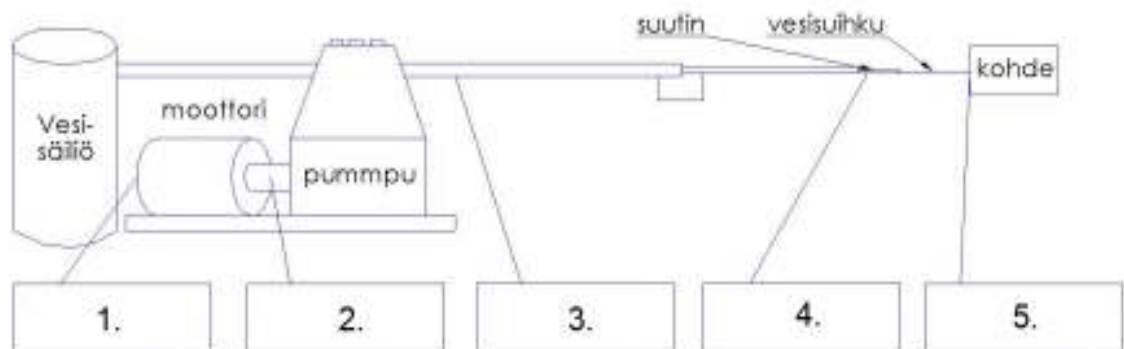
Laadukkaimman leikkausjäljen saavuttaminen vaatii leikkausnopeuden laskemista. Erityisen hyvänlaatuinen leikkausjälki saattaa vaatia jopa viisinkertaisen leikkausajan. KMT-yrityksen julkaisun mukaan suurella leikkausnopeudella vesisuihkuleikkuri saa aikaan V-muotoisen leikkausprofiilin. Tämä jättää materiaalin alapinnasta epätasaisen. Kun leikkausnopeutta lasketaan, myös leikkausjälki on tasaisempi. Kun käytetään yhtä viidesosaa maksimileikkausnopeudesta, saadaan aikaan suoraseinäinen leikkausjälki hyvällä leikkauspinnan laadulla. Leikkausnopeutta edelleen laskettaessa muuttuu vesisuihkun liikkeen ohjattavuus heikommaksi ja eroosion osuus kasvaa leikattavassa

materiaalissa, joka ilmenee leikkausprofiilin A-tyyppisessä muodossa. (KMT 2005, s.13)

Vesisuihkun virtausnopeus määräytyy kahden tekijän perusteella. Ensimmäinen tekijöistä on leikkauspaineen suuruus, jolla vesi tuodaan vesisuihkun muodostavalle suuttimelle. Toinen määräävä tekijä on suuttimen halkaisijan koko. Vesisuihkun muodostava suutin on yksinkertaistettuna kuristin, joka kiihdyttää veden nopeasti virtaavaksi suihkuksi.

Yksi tapa saada aikaan haluttu leikkauspaine on käyttää matalapainepumppua ja sen lisäksi paineenmuunninta. Paineenmuunnin voi perustua pneumatiikkaa tai hydraulikkaa hyödyntävään tekniikkaan. Toinen vaihtoehto leikkaavan vesisuihkun aikaan saamiseksi on käyttää painelähteenä korkeapainepumppua, josta energia johdatetaan putkiston kautta leikkaukselle ja siitä leikkaavana suihkuna kohti materiaalia. Näiden yhdistelmien leikkauspaineen aikaansaama veden tilavuusvirtaus leikkauksessa olevan suuttimen läpi tuottaa leikkaavan vesisuihkun.

Kun vesisuihku osuu materiaaliin, sen massavirrasta riippuva liike-energia muuttuu materiaaliin vaikuttavaksi pintapaineeksi. Materiaaliin vaikuttavan vesisuihkun aikaansaama pintapaine tulee olla tarpeeksi suuri, jotta haluttu leikkaava vaikutus saataisiin aikaan. (Summers 1995, s.4) Tämä saadaan aikaan kun vesisuihkun aiheuttama pintapaine ylittää materiaalin puristuslujuuden (Prolaser). Oleellisin asia, joka vaikuttaa leikkaustapahtumaan, on materiaaliin iskeytyvän veden massavirta. Leikkaavan vesisuihkun massavirtaan päästään vaikuttamaan pumpun ja suuttimen valinnalla. Pumpulla vaikutetaan suuttimelle saapuvan veden paineeseen ja suuttimen valinnalla vaikutetaan leikattavaan materiaaliin osuvan vesisuihkun nopeuteen ja vesisuihkun osuma-alueen pinta-alaan. Kun kyseessä on vesisuihkuleikkausjärjestelmä, on tehon siirtäminen leikkaustilanteeseen hyvällä hyötysuhteella läpi järjestelmän hankalaa suurien häviöiden takia. Kuvassa 2.1 on esitetty numeroituina kohdat, joissa on havainnollista tarkkailla vesisuihkuleikkausjärjestelmän eri osissa ilmeneviä energiahäviöitä.



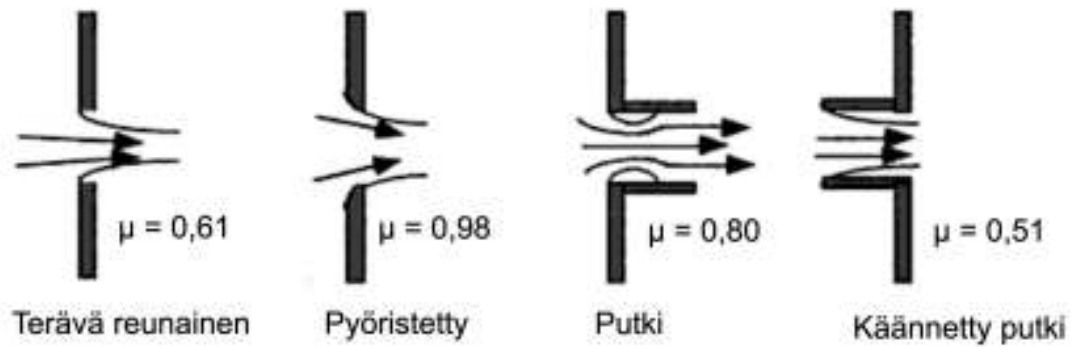
Kuva 2.1. Energian häviäminen vesisuihkuleikkausjärjestelmässä. (Summers 1995, s.28)

Kuvan 2.1 ensimmäinen kohta esittää lähtökohtaa, missä järjestelmän energia ei ole vielä laskenut sen alkuperäisestä suuruudesta. Kohdassa kaksi energiaa häviää sen siirtyessä moottorilta pumpulle tietyn hyötysuhteen osoittaman määrän verran. Kohta kolme esittää järjestelmän putkistossa ilmeneviä energiahäviöitä. Nämä putkistossa aiheutuvat energiahäviöt ovat niin sanottuja kertahäviöitä. Kertahäviöt ilmenevät kohdissa, joissa esimerkiksi virtauspoikkipinta äkillisesti supistuu tai putkistossa on käyriä (Fonselius et al. 1997, s.12). Kohdassa numero neljä aiheutuu leikkauspään suuttimessa energian häviämistä, johtuen kitkasta veden ja suuttimen välillä. Leikkauspään suuttimessa tapahtuvia energiahäviöitä kuvaa purkauskerroin μ , josta kerrotaan enemmän seuraavassa kappaleessa (luku 2.5. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin). Kuvan 2.1 kohdassa numero viisi on järjestelmän energian suuruus kaikkien edellä tapahtuneiden häviöiden jälkeen. Tässä viimeisessä kohdassa voidaan arvioida kokonaisenergiasta leikattavaan kohteeseen vaikuttavaksi energiaksi noin 13 prosenttia sen alkuperäisestä suuruudesta. Tarkat laskutoimitukset kuvassa 2.1 ilmenevien energiantasojen määrille esitetyissä häviökohdissa ovat tehtävä tapauskohtaisesti eri tilanteissa. Tämä on oleellista kun halutaan tuntea tietyn käytetyn järjestelmän energiahäviöiden suuruudet.

Vesisuihkuleikkaamiseen tarkoitettuja suuttimia on tarjolla laaja valikoima. Vesisuihkun leikkauspäätä varten on olemassa vaihdettavia suuttimia, joista valitaan oikean halkaisijan ja suutin materiaalin omaava suutin suoritettavaa leikkausta varten. Suuttimien valmistamisessa käytetään muun muassa safiiria ja timanttia, toimivan ratkaisun aikaansaamiseksi (Kmtgroup). Suutin on myös kuluva osa, joten sen vaihtaminen tietyn ajan kuluessa on välttämätöntä.

Leikkauspään suuttimen muodostavalle vesisuihkulle voidaan laskea nopeus käyttämällä Bernoullin ja jatkuvuusyhtälön avulla muodostettua kaavaa (1). Kaavan (1) soveltaminen onnistuu tilanteissa, joissa kuristuksen pinta-ala on paljon normaalia virtaus poikkipinta-alaa pienempi. Tässä tilanteessa jatkuvuusyhtälön mukaan kuristuksen läpi virtaava nopeus on taas huomattavasti suurempi sitä verrattaessa normaaliin virtausnopeuteen. Kurituksen läpi kulkevaan tilavuusvirtaan vaikuttaa paineeron, pinta-alan ja tiheyden lisäksi myös virtausaukon ominaisuudet, kuten sen muoto ja reunojen terävyys. Nämä ominaisuudet otetaan huomioon purkauskertoimella μ . (Kauranne et al. 1996 s.33)

Suuttimen suorituskykyä mallinnettaessa tulee ottaa huomioon suuttimen muoto. Tyypillisiä suuttimen muotoja ja niihin liittyviä purkauskertoimia on esitelty kuvassa 2.2. Kuvassa 2.2 on mallinnettu mustien nuolien avulla, miten suuttimen muoto vaikuttaa nesteessä oleviin virtauksiin.



Kuva 2.2. Suuttimen muotoja ja niihin liittyviä purkauskertoimia. (Summers 1995, s.59)

Suuttimen muoto otetaan laskuissa huomioon purkauskertoimen μ avulla, jolle voidaan antaa arvoja aina ykköseen asti. (Summers 1995, s.58) Purkauskertoimen suuruus riippuu leikkauspaineesta sekä leikkauspään suuttimen muodosta ja laadusta. (Liu 2004, s.18) Kun purkauserroin on yksi, on kyseessä malliltaan ideaalinen suutin, joka käytännössä on mahdoton toteuttaa. Suorituskyvyltään hyvän suuttimen purkauserroin on lähellä arvoa 0.95, kun taas huonon suuttimen purkauskertoimen arvo on noin 0,51. (Summers 1995, s.59)

Tunnettaessa käytettävän leikkauspään suuttimen purkauserroin, sekä leikkaustilanteessa käytetty leikkauspaine, voidaan laskea sen antaman vesisuihkun nopeus. Vesisuihkun nopeus v voidaan laskea käyttämällä sitä varten johdettua kaavaa (1).

$$v = \mu \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (1)$$

missä: v = vesisuihkun virtausnopeus

μ = purkauserroin

p = leikkauspaine

ja

ρ = (veden)tiheys

Kaavalla (1) voidaan sitä muunneltaessa laskea vesisuihkun suuttimen läpi kulkeva tilavuusvirta. Jatkuvuusyhtälön mukaan nopeuden v paikalle voidaan johtaa tilavuusvirta asettamalla yhtälön oikealle puolelle leikkauspään suuttimen virtaus poikki pinta-ala. Saatua kaavaa edelleen muuntamalla voidaan laskea suuttimen pinta-ala nesteen virtausnopeuden ja painetason avulla.

Leikattaessa vesisuihkulla on usein tärkeää estää leikattavan materiaalin ylimääräinen kastuminen. Leikkausuran reunojen kastuminen on välttämätöntä materiaalia vesisuihkulla leikattaessa. Ylimääräinen haittaavampi kastuminen seuraa vesisuihkun takaisin roiskumisesta leikkaustason ja leikkausaltaan pinnasta.

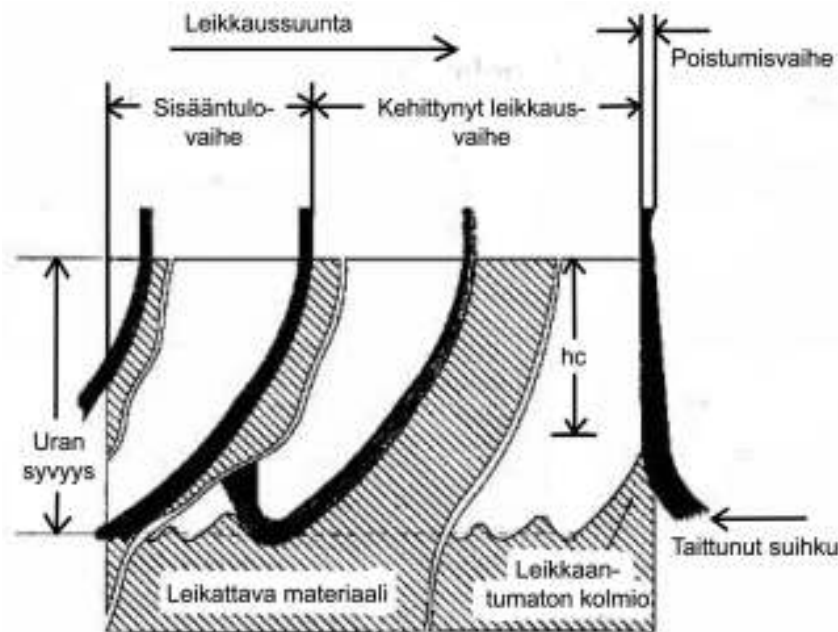
Leikkaustapahtumassa esiintyvään veden roiskumiseen vaikutetaan valitsemalla huolellisesti leikkaustasona käytetty materiaali. Leikkaustaso tulee olla malliltaan rutiläntapainen, jotta siitä takaisin roiskuvan veden määrä olisi mahdollisimman vähäinen. Rutilän poikkisuuntaisen verkon muodostavien levyjen pinta-ala suunnitellaan mahdollisimman pieneksi. Vesisuihkua vastaan oleva pinta-ala minimoidaan valitsemalla mahdollisimman kapeat leikkausalueen poikki kulkevat rutilän muodostavat levyt. Mitä pienempi rutilän pinta-ala on, sitä vähemmän aikaa myös leikkaava vesisuihku roiskuu alueelta. Leikkaustason tulee myös pystyä kannattelemaan siinä leikattavaa materiaalia, joten sen vesisuihkua vastaan kohdistuvaa pinta-alaa ei voida liiaksi pienentää tästä aiheutuvan rakenteen heikentymisen vuoksi.

Roiskumisen vähentämistä varten on olemassa niin sanottu sieppari, joka sijoitetaan leikattavan materiaalin ja leikkauspään alle. Sieppari kerää vesisuihkun lisäksi sen mukana kulkevat materiaalista irtoavat partikkelit. Lisäksi siepparia käytettäessä ei vesisuihku aiheuta niin paljon melua, sillä melu syntyy vesisuihkun ja ilmamassan kontaktista. Huonona puolena siepparilla on sen leikkauspään massaa ja kömpelyyttä lisäävä vaikutus. (Summers 1995, s.191)

Roiskumista aiheuttaa myös vesisuihkun osuminen leikkausaltaan pohjalle tai leikkausaltaaseen kerääntyneen veden pintaan. Tämän kaltaisen roiskumisen vähentämiseksi tulee leikkausaltaan olla mahdollisimman syvä. Syvää allasta ei voida aina valita tilannetta varten esimerkiksi verstaan koon rajallisuuden takia. Tässä tilanteessa roiskumista voidaan vähentää pitämällä altaassa vettä. Leikkaavan vesisuihkun osuessa veden pintaan, eikä altaan pohjaan, ei materiaalia vahingoittavaa roisketta synny verrattaessa yhtä paljon.

2.2. Leikkausprosessin vaiheet

Hashish (1984) kehitti abrasiivia käyttävälle painevesisuihkulle mallin, joka kuvaa leikkausuran syntymistä eri vaiheiden avulla. Tutkimukset hän suoritti leikkaamalla läpinäkyviä materiaaleja kuten lasia, lexania ja pleksiä. Mallillaan hän esittää, että painevesisuihkun itseään toistava syklinen leikkaava liike voidaan esittää kaksiulotteisena tapahtumana. Mallissa tarkastellaan leikattavaa materiaalia sivulta päin, jolloin leikkaussuunta näkyy pitkittäissuunnassa x-akselina ja leikkaussyvyys y-akselin suuntaisena. Tarkasteltaessa leikkausta leikkaavan vesisuihkun leikkaussuunnan mukaisesti, voidaan leikkausprosessi jakaa kolmeen eri vaiheeseen. Hashishin (1984) mukaan leikkausprosessin kolme eri vaihetta ovat: sisään tulovaihe, kehittynyt leikkausvaihe ja poistumisvaihe. Vaiheet on esitelty kuvassa 2.3. (Liu 2004, s.33)



Kuva 2.3. Leikkausprosessin vaiheet. (Liu 2004, s.33)

Sisääntulovaiheessa erilaiset leikkausprosessit kehittyvät kunnes leikkausuran maksimi syvyys saavutetaan. Tämän ensimmäisen vaiheen aikana vesisuihku liikkuu leikattavan materiaalin päälle, jolloin leikkausuran syvyys kasvaa. Kun haluttu leikkaussyvyys on täysin saavutettu, on ensimmäinen vaihe eli sisääntulovaihe käyty läpi. (Liu 2004, s.34)

Leikkausprosessin toinen vaihe on kehittynyt leikkausvaihe, jossa leikkausprosessi etenee syklisesti. Tämä syklinen itseään toistava leikkaaminen jatkuu kunnes kyseinen toinen vaihe on käyty loppuun asti ja viimeinen poistumisvaihe alkaa. Toisen vaiheen yhden syklin pituus on suunnilleen vesisuihkun halkaisija. Tilanteissa joissa vesisuihku ei leikkaa materiaalista läpi on leikkausuran pohja epätasainen ja se koostuu ylä- ja alamäistä, jotka toistavat syklisesti itseään. (Liu 2004, s.34) Kuvassa 2.2 leikkausuran syklisyys nähdään aaltomaisena alueena leikattavassa materiaalissa olevan leikkausuran syvimmässä kohdassa.

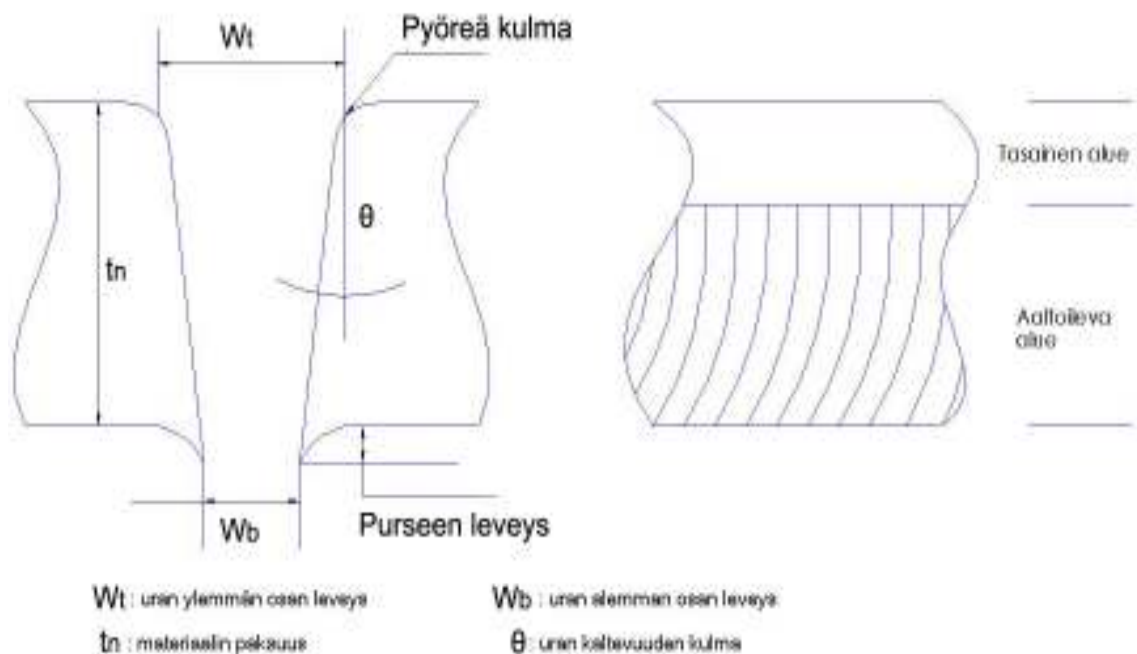
Viimeisessä vaiheessa eli poistumisvaiheessa leikkausprosessi saatetaan päätökseen. Vesisuihkun poistuessa leikattavasta materiaalista syntyy leikkausuran loppuun kolmion mallinen väkänä, joka johtuu vesisuihkun taitumisesta materiaalista ulospäin. Leikkausuraan jäävä kolmio osoittaa, että leikkausura on tasainen tiettyyn h_c syvyyteen asti, joka on mitattavissa urassa olevasta kolmion kärjestä. (Liu 2004, s.34). Kuvassa 2.3 oleva syvyys h_c ilmoittaa leikkausuraan muodostuvan konkreettisen uran syvyyden.

2.3. Leikkausuravaihtoehdot

Vesisuihkun aikaansaaman leikkausuran yleiset piirteet koostuvat sen syvyydestä, suippenevista seinämistä ja uran eri leveyksistä. Leikkausuran pinnan rosoisuutta ja

aaltoilevuutta voidaan pitää myös yleisinä siihen liittyvinä piirteinä. Leikkausuran eri piirteillä voidaan arvioida aikaansaadun leikkausjäljen laatua. (Liu 2004, s.37)

On olemassa kahdentyyppisiä leikkausjälkiä: läpileikatut ja ei-läpileikatut leikkausjäljet. Läpileikatulle leikkausjäljelle tyypillinen geometrinen piirre on esitelty kuvassa 2.4. joka koostuu hieman leveämmästä uran ylemmästä osasta ja tämän jälkeen kapenevasta leikkausurasta kuljettaessa syvemmälle leikattavaan materiaaliin. Läpileikkauksessa syntyvässä urassa on myös kaksi erityyppistä aluetta: ylempi pinnaltaan sileä alue ja alempi pinnaltaan aaltoilevampi alue. (Liu 2004, s.38) Kuvassa 2.4. esitellään myös leikkausuran kaltevuuden kulma. Leikkausuran kaltevuuden kulma kuvaa leikkausuran reunan ja leikattavan materiaalin pintaan vedetyn normaalin välistä kulmaa. Kaava (2) esittää miten kaltevuuden kulma saadaan laskettua leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveyksien avulla. Laskettaessa kaltevuuden kulmaa tulee ottaa huomioon myös leikattavan materiaalin paksuus.



Kuva 2.4. Materiaalin läpi kulkeva leikkausura. (Liu 2004, s.37)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w_t - w_b}{2} * \frac{1}{t_n}\right) \quad (2)$$

missä: θ = leikkausuran kaltevuuden kulma

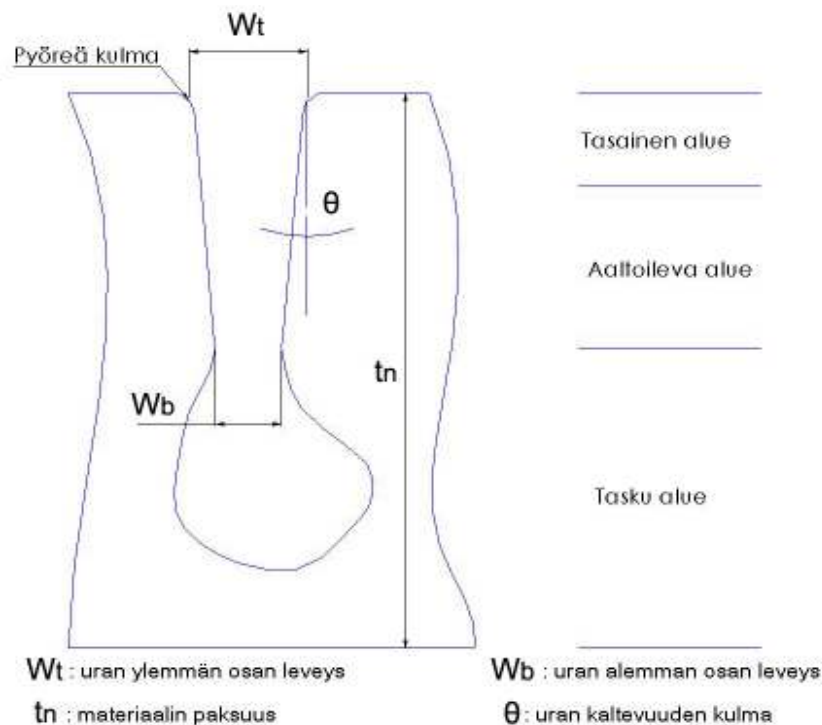
w_t = leikkausuran ylemmän osan leveys

w_b = leikkausuran alemman osan leveys

ja

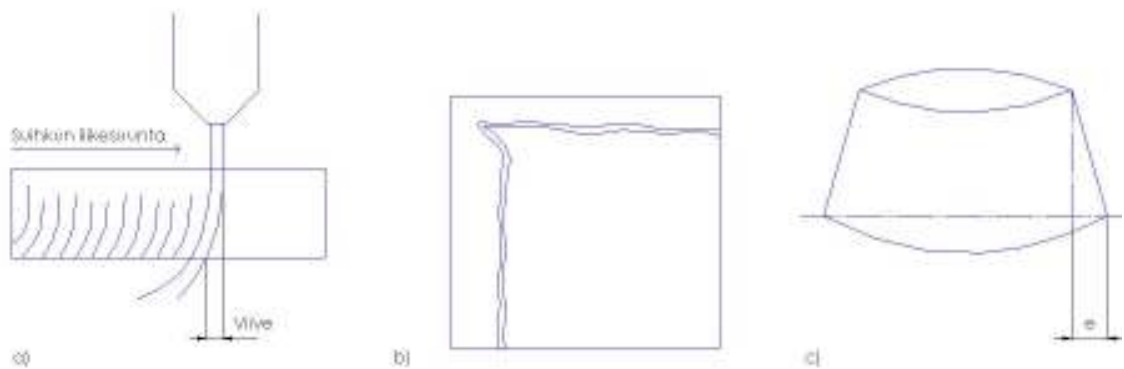
t_n = materiaalin paksuus

Leikattaessa materiaalia vesisuihkulla, jonka aikaansaatu leikkaussyvyys on pienempi kuin materiaalin paksuus saadaan aikaan ei-läpileikattu ura, jolla on itselleen tyypilliset ominaispiirteet. Ei-läpileikatun leikkausuran ominaispiirteet ovat esitetty kuvassa 2.5. Ylempi osa leikkausurasta muistuttaa kovasti kuvan 2.4 läpileikattua leikkausuraa. Vesisuihkun taittuvuuden ja epästabiiliuden sekä partikkelien kimpoilemisen seurauksena leikkausuran alaosaan muodostuu epäsymmetrinen tasku. Chen et al. (1996) on jakanut tämän tyyppisen leikkausuran kolmeen eri alueeseen, joista kaksi ensimmäistä ovat identtiset suhteessa läpileikkauksessa syntyvään uraan. Saman tutkimuksen mukaan uusi kolmas alue on epäsäännöllinen taskumainen alue, joka on ei-läpileikkauksessa syntyvän leikkausuran alaosa (Liu 2004, s.39).



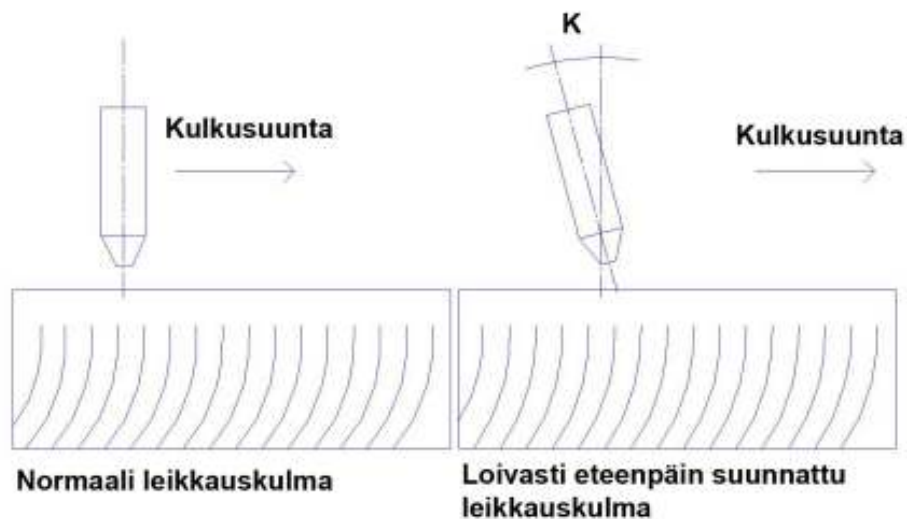
Kuva 2.5. Materiaalin sisälle jäävä leikkausura. (Liu 2004, s.39)

Vesisuihkulla abrasiivin kanssa leikattaessa on normaalia, että leikkausura kulkee leikattavan materiaalin alapuolella pienellä viiveellä verrattaessa sitä uran etenemiseen leikattavan materiaalin yläpuolella. Tämä viive johtuu painevesisuihkun taitumisesta leikkaussuuntaan nähden sitä vastakkaiseen suuntaan. Vesisuihkun taituminen on esitetty kuvassa 2.6 (a). Leikattaessa teräviä kulmia vesisuihkun on ehdittävä asettua leikkausreunan suhteen yhdensuuntaiseksi, muuten kulmaan syntyy virhe e , kuten kuvasta 2.6 (b) nähdään. Leikattaessa kaarevaa muotoa on vesisuihkun viive otettava huomioon virheen e avulla. (Liu 2004, s.42) Viive pakottaa leikkaavan vesisuihkun alaosan seuraamaan vesisuihkun leikkaavaa yläosaa virheen e osoittaman määrän jäljessä. Leikattaessa kaarevaa muotoa kuten kuvassa 2.6 (c) on esitetty, on vesisuihkun viiveen aikaansaama virhe e muodostanut leikkausuran alemmasta osasta suuri säteisemmän kaaren.



Kuva 2.6. (a) Vesisuihkun viive Kulecin mukaan (2002), (b) Kuva viiveen aiheuttamasta virheestä leikkausurassa Wangin ja Liun (1994) mukaan (2002), (c) Virhe leikattaessa ympyrä Zengin ja Munozin mukaan (1994) (Liu 2004, s.42).

Vesisuihkun suunta muuttuu sen leikatessa materiaalia, jonka seurauksena sen materiaaliin kohdistuva leikkausteho pienenee. Vesisuihkun suunnan muuttumisella tarkoitetaan kuvassa 2.6 (a) näkyvää vesisuihkun taaksepäin taittumista. Tästä seuraamuksesta voidaan todeta, että muuttamalla leikkauskulmaa, kulmaa joka muodostuu painevesisuihkun ja materiaalin välisen normaalin väliin, voidaan leikkaustehoa kasvattaa. On myös osoitettu, että lisäämällä kulmaa 15-20 asteeseen pystytään painevesisuihkulle materiaalissa aiheutuva taittuma hävittämään (Liu 2004, s.61).



Kuva 2.7. Vesisuihkun suuntaaminen eteenpäin. (Liu 2004, s.61)

Materiaalia pystytään leikkaamaan tehokkaammin kuvan 2.7 osoittamalla tavalla eli kääntämällä leikkauspää osoittamaan loivasti eteenpäin kulman K verran. Chen et al. (1998) suorittamien kokeiden avulla on pystytty todistamaan, että suurin syvyys saavutetaan käyttämällä 5-10 asteen leikkauskulmaa.

2.4. Vesisuihkun ominaisuudet

On oleellista tuntea vesisuihkun dynaaminen käyttäytyminen. Dynaamisella käyttäytymisellä tarkoitetaan vesisuihkun nopeuden ja paineen jakautumista suihkun eri osiin. Vesisuihkun käyttäytymisen tunteminen auttaa ymmärtämään sen aikaansaaman leikkausjäljen profiilin muotoa, rosoisuutta ja syvyyttä.

Leikkausetäisyyden eli etäisyyden leikkauspään ja leikattavan materiaalin välillä kasvaessa, vesisuihkun muoto muuttuu leveämmäksi. Tämä vesisuihkun hajoaminen huomataan tarkasteltaessa vesisuihkua sen eri kohdissa. Leveyden muuttumisen näkee vertailtaessa vesisuihkun leveyttä sen alkupisteessä suuttimen kohdalla ja kohdassa, jossa se on kulkenut valitun leikkausetäisyyden osoittaman matkan. Vesisuihkun hajoaminen johtuu ilmanvastuksesta ja paineen muutoksesta nesteen tullessa ulos leikkauspäästä.

On todettu, että vesisuihkun halkaisija kasvaa siirtyessään kauemmaksi leikkauspäästä ja, että vesisuihkun nopeus pienenee käänteisesti verrattaessa leikkausetäisyyteen. Tämän vesisuihkun kulkeman matkan ja sen nopeuden välisen suhteen on todennut muun muassa Yanaida (1974) (Summers 1995, s.803).

Yanaidan (1974) suorittamien tutkimusten mukaan vesisuihku muodostuu kolmesta erilaisesta alueesta, joita ovat: ydin-, siirtymä- ja pääalue. Potentiaalinen ydin ja siirtymävaihe muodostavat Yanaidan (1974) mukaan alkuvaihealueen, jonka pituus voidaan määrittää mitatun tiedon ja Reynoldsin luvun avulla. Hashishin ja Plessisin (1979) päätelmien mukaan alkuvaihealueen pituus riippuu myös leikkauspäässä olevan suuttimen muodosta sekä vesisuihkun leikkauspaineesta. (Liu 2004, s.14)

Dynaaminen paine tarkoittaa vesisuihkun luomaa pintapainetta materiaalin pinnalle osuessaan siihen. Dynaaminen paine muuttuu riippuen siitä, missä kohtaa sitä vesisuihkun sisällä tarkkaillaan. Vesisuihku ei itsessään luo dynaamista painetta sisäänsä ennen kuin se pääsee vaikuttamaan leikattavaan materiaaliin. Veden dynaamisen paineen on todettu olevan vakio ydinalueella, mutta siirryttäessä seuraavaan siirtymävaiheeseen vesisuihkun akselia pitkin alkaa veden dynaaminen paine hiljalleen laskea. Saavuttaessa lopulta vesisuihkun viimeiseen osaan eli pääalueeseen laskee veden dynaaminen paine jyrkästi. (Liu 2004, s.15)

Vesisuihkun dynaamiseen paineeseen liittyvän ilmiön ovat raportoineet myös Davies ja Jackson (1981). Heidän mukaansa tietyissä tutkimusolosuhteissa vesisuihkun dynaamisen paineen lasku on minimaalista kuljettaessa 100 kertaa suuttimen halkaisijan koko suihkun kulkusuuntaan, jonka jälkeen tapahtuu suuri dynaamisen paineen laskeminen. (Liu 2004, s.15) Yanaida (1974) kehitti kaavan (3), joka kuvaa vesisuihkun dynaamista painetta sen keskellä suhteessa vesisuihkun alkuvaihealueen pituuteen (Liu 2004, s.16)

$$\frac{p_m}{p_0} = \frac{x_c}{x} \quad (3)$$

missä: x_c = alkuvaihealueen pituus

x = etäisyys suuttimelta pitkin painevesisuihkun suuntaista akselia

p_m = vesisuihkun keskiakselilla vaikuttava dynaaminen paine

ja

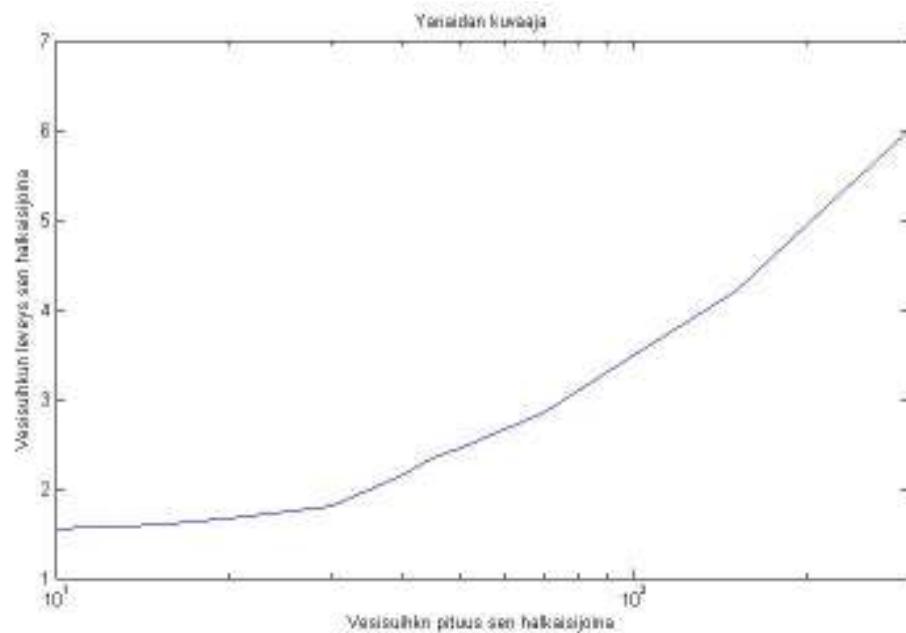
p_0 = dynaaminen paine leikkauspään suuttimen kohdalla

Yanaida (1974) kehitti myös tavan laskea vesisuihkun dynaaminen paine, missä tahansa vesisuihkun kohdassa. Tätä laskutoimitusta varten tulee kuitenkin tuntea vesisuihkun alku- ja pääalueen tarkat pituudet (Liu 2004, s.17). Vesisuihkun dynaaminen paine laskee riippumatta kuljetaanko leikkauspään suuttimen kohdalta suihkun suuntaisesti tai loittonevasti suihkun keskiakselilta.

2.5. Vesisuihkun hajoaminen ja energiatiheys

Leikkaavalla vesisuihkulla on paljon kineettistä energiaa, joka muuttuu materiaaliin vaikuttavaksi potentiaalienergiaksi osuessaan sen pintaan. Potentiaalienergia saa aikaan materiaaliin vaikuttavan pintapaineen, joka rikkoo materiaalin pintaa. Vesisuihkun kulkiessa ilman läpi, ennen iskeytymistään leikattavaan materiaaliin, sen kineettistä energiaa kuluttaa ilman aiheuttama vastus. Vesisuihku liikkuu periaatteessa täysin paikallaan olevan ilmamassan läpi, joka leikkaa vesisuihkun uloimmista osista ikään kuin pisaroita. Vesisuihkun teho heikkenee pisaroiden leikkaantuessa siitä irti. Mitä kapeampi vesisuihku on, sitä voimakkaammin leikkaantumisen aiheutuva vesisuihkun heikkeneminen ilmenee. Kineettisen energian pienenemiseen leikkausetäisyyden kasvaessa vaikuttaa myös vesisuihkun hajoaminen kartion mallisesti. Mitä suurempi vesisuihkun halkaisija on, sitä enemmän ilman aiheuttama vastus syö sen kineettistä energiaa. (Summers 1995, s.74)

Yanaida (1974) käytti vesisuihkun hajoamiseen liittyvissä tutkimuksissa apunaan erilaisia mittausvälineitä, joihin kuului muun muassa valokuvaaminen ja nopeudenmittausputki. Tutkimuksissa todettiin, että vesisuihkun halkaisija on verrannollinen kuljetun matkan neliöjuureen tarkasteltaessa vesisuihkua sen kulkusuunnassa. Yanaidan tutkimusten mukaan suuttimen koko, joka on käytännössä vesisuihkun alkupään halkaisija ja leikkausetäisyys, ovat yhteydessä toisiinsa. Tämän teorian avulla saadaan vesisuihkun leviäminen arvioitua käyttämällä leikkauspäässä olevan suuttimen kokoa ja leikkausetäisyyttä. Leikattaessa materiaalia 0,18 millimetrin kokoisella suuttimella 18 millimetrin etäisyydeltä on Yanaidan (1974) mukaan vesisuihku ehtinyt hajota noin kymmenen kertaa sen suuttimen kokoiseksi. Tässä tapauksessa vesisuihku on noin kymmenen kertaa 0,18 millimetriä eli vesisuihku olisi halkaisijaltaan 1,8 millimetriä edettyään 1,8 senttimetriä.



Kuva 2.6. Yanaidan (1974) tutkimuksiin perustuva kuvaaja suuttimen koon ja vesisuihkun hajoamisen välisestä suhteesta (Summers 1995, s.804)

Vesisuihkulle ei vielä ole kehitetty toimivaa kaavaa, jonka avulla saataisiin laskettua nopeuden muutos leikkausetäisyyttä kasvatettaessa (Liu 2004, s.16). Neusen et al. (1994) tutkimuksien perusteella on kuitenkin pystytty osoittamaan, että vesisuihkun nopeus on melkein vakio liikuttaessa alueella, joka saadaan laskemalla 48–125 kertaa suuttimen halkaisijan koko (Liu 2004, s.16). Poistuttaessa tältä alueelta, jolla vesisuihkun nopeus on lähellä vakiota, alkaa vesisuihkun suuntainen nopeus nopeasti laskea. Tämän nopean laskun syyksi ovat Chen ja Geskin (1990) ilmoittaneet olevan vesisuihkun energian hajaantuminen kuljettaessa pidemmälle vesisuihkun leikkaamissuunnassa (Liu 2004, s.16).

Voidaan siis oletetaan vesisuihkun nopeuden pysyvän samana liikuttaessa alueella, jolla leikkausetäisyys on suhteellisen pieni. Käytettäessä 0,25 millimetrin suutinta voidaan olettaa vesisuihkun nopeuden pysyvän samana 12:sta 31:teen millimetriin. Tarkasteltaessa tilannetta, jossa liikutaan tällä lasketulla alueella, ei vesisuihkun nopeus muutu. Nopeuden ollessa lähellä vakiota, ei vesisuihkun kineettinen energiakaan juuri muutu. Vesisuihkun leveys laajenee vesisuihkun kulkusuuntaan edettäessä ja tämän takia energiatiheys vähenee eli tiettyä pinta-alaa vastaava teho laskee.

Virtauksen teho lasketaan suuttimen suorituskykyyn liittyvän kaavan avulla. Laskettaessa virtaustehoa eli vesisuihkun antamaa tehoa, otetaan huomioon systeemin painetaso ja leikkauspään läpi kulkeva tilavuusvirta. Kaava (4) esittää miten virtauksen aikaansaama teho lasketaan. (Summers 1995, s. 49)

$$P = Q * p \quad (4)$$

missä: P = teho
 p = leikkauspaine

ja

Q = tilavuusvirta

Vesisuihkun energiavirta lasketaan kaavan (5) mukaan. Laskettaessa vesisuihkun energiavirtaa asetetaan kineettisen energian laskemiseen tarkoitettuun kaavaan massan tilalle massavirta, jolloin pystytään laskemaan vesisuihkun energiavirta.

$$E_{km} = \frac{1}{2} m * v^2$$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{2} \dot{m} * v^2 \quad (5)$$

missä: E = energiavirta
 E_{km} = kineettinen energia
 m = massa
 \dot{m} = massavirta

ja

v = nopeus

Kineettisen energian selvittämiseksi, sekä tutkittaessa vesisuihkun tehoa, tulee tuntea vesisuihkun nopeus. Vesisuihkun maksimi nopeus saadaan laskettua leikkauspään suuttimen läpi kulkevasta tilavuusvirrasta jatkuvuusyhtälön osoittamalla tavalla.

$$Q = A * V_0$$

$$\Leftrightarrow V_0 = \frac{Q}{\pi * a^2} \quad (6)$$

missä: A = suuttimen sisäpuolen pinta-ala
 a = suuttimen säde
 V_0 = vesisuihkun maksiminopeus

ja

Q = tilavuusvirta

Kaavassa (6) käytetyn pinta-alan A kautta päästään käsiksi suuttimen sisäpuolen halkaisijaan. Maksimi nopeus V_0 voidaan tämän jälkeen laskea vesisuihkussa käytetyn suuttimen halkaisijan koon mukaan. (Kanou ja Shimozawa 1984, s.402)

2.6. Teoria kiven leikkaamisesta vesisuihkulla

Vesisuihkuleikkaukseen liittyvien teorioiden puutteena on ollut niiden keskittyminen vain tiettyyn hetkeen ja kohtaan leikkausprosessissa. Nämä teoriat liittyvät hetkeen, jolloin vesisuihku osuu leikattavaan materiaaliin. Vesisuihkun ja materiaalin yhteen osumahetki on leikkausprosessissa erittäin hetkellistä, sillä vesisuihku pystyy leikkaamaan materiaalia sekunnin aikana jopa 0,2 metrin syvyydeltä, joten asiaa käsittelevät teoriat antavat useimmiten mielenkiinnoltaan vain toisarvoista tietoa. Tällaisista teorioista poikkeava, ja täten varsin käyttökelpoinen on niin sanottu Crown teoria. Crow S.C. kehitti teoriansa vuonna 1973 ja esitteli sen teoksessaan: *A theory of hydraulic rock cutting*. Hänen teoriansa käsittelee kiven jatkuvaa leikkausprosessia. Kyseinen teoria onkin saanut paljon huomiota tutkijoiden keskuudessa.

Crown havainto oli se, että vesisuihkun leikatessa kiveä syntyy vakaa tila, missä kiven pintaan muodostuu vain vähän leikkaavaa rasiutusta. Vesisuihku leikkaa kiveen viillon, jonka leveys vastaa vesisuihkun leveyttä. Tätä viiltoa tarkasteltaessa leikkaushetkellä huomataan, että se kääntyy syvemmällä hiljalleen pystysuorasta vaakasuoraksi. (Summers 1995, s.818)

Crow totesi, että leikattavan materiaalin pintaan kohdistuvan leikkaavan rasituksen vähyys perustui siihen, että pinnan poikki virtaavan nesteen aiheuttama pintapaine synnyttäisi kavitaatiota. Samanaikaisesti pinnalla vaikuttava vesisuihkun aikaansaama korkea pintapaine saisi kavitaation kuplat pysymään pintaa vasten. Tämän tilanteen aikaansaamana kiven leikkauspinnassa olevat leikkaantuvat rakeet olisivat suorassa kosketuksessa leikkaavaan vesisuihkun kanssa. (Summers 1995, s.818)

Crown malli olettaa, että tarkastelu tilanteessa on kyseessä vakiovauhdilla tapahtuva leikkaus. Tilanteessa oletetaan myös, että leikkauspinnasta leikkaantuvat rakeet ovat irtoamassa vesisuihkun leikatessa materiaalia. Tämä tarkoittaa, että vesisuihku leikkaa tietyn määrän rakeita irti materiaalista sisältämänsä kineettisen energian rajoissa. Näiden toteamuksien avulla voidaan määrittää olosuhteet kiven murtumishetkelle. Murtumishetki määritetään laskemalla rakeisiin vaikuttavat jännitykset ja ottamalla samalla huomioon leikattavan materiaalin kestävyys. Tämän ansioista voidaan vesisuihkulle määrittää vakionopeus, jolla voidaan leikata valittua kivi materiaalia haluttuun syvyyteen asti. (Summers 1995, s.819)

3. VESI VÄLIAINEENA JA SOVELLUSKOHTEET

Vesisuihkuleikkaus soveltuu käytettäväksi moniin kohteisiin useista syistä. Veden käyttäminen leikkaavana materiaalina tekee kyseisestä työstämismenetelmästä käytännöllisen. Vesi voidaan hävittää helposti ilman luontoa kuormittavia puhdistustoimenpiteitä. Vesi on myös edullinen väliaine leikkaamiseen verrattuna muihin tarjolla oleviin vaihtoehtoihin, kuten metallisiin teriin, jotka kuluvat leikkausprosessissa. Vesisuihkulla voidaan leikata materiaaleja, jotka ovat herkkiä kuumuudelle. Tämä on mahdollista, sillä leikkaava vesi ei lämpene merkittävästi ja mahdollinen leikkauskohdassa syntyvä lämpö siirtyy suihkuavan veden mukana pois materiaalin pinnalta. Tämänlainen herkkien materiaalien leikkaaminen ilman kuumuudesta materiaalissa aiheutuvia muutoksia ei ole mahdollista esimerkiksi laserleikkuria käytettäessä. Vesisuihkuleikkaus on usein edullisempaa, yksinkertaisempaa ja luontoystävällisempää kuin muut sen kanssa kilpailevat leikkausmenetelmät, joten se on potentiaalinen soveltamiskohde eri aloille.

Hydrauliikassa voidaan käyttää väliaineena vettä tai mineraaliöljyä. Veden käyttäminen hydraulijärjestelmissä luo uusia haasteita suunnittelijoille. Vesihydraulistajärjestelmää suunniteltaessa on otettava huomioon veden poikkeavat ominaisuudet, verrattaessa sitä perinteisempään väliaineeseen, mineraaliöljyyn. Käytettäessä vettä on otettava huomioon sen aikaansaama eroosio, korroosio, käyttäytyminen eri lämpötiloissa, mikrobiologiset haittatekijät ja mahdollisesti muuttuva laatu vesijohtoverkostossa.

3.1. Vesi väliaineena hydraulijärjestelmässä ja vesisuihkuleikkurissa

Veden hyödyntäminen hydraulilaitteissa tuo mukanaan tiettyjä etuja. Kun pystytään takaamaan käytetyn veden puhtaus, voidaan sitä käyttää hydraulisissa sovelluksissa vapaammin kuin mineraaliöljyä. Esimerkiksi elintarvikkeita voidaan leikata ilman tuotteen saastuttamisen vaaraa käyttämällä puhdasta vettä leikkaavan vesisuihkun muodostamiseen.

Käytettäessä vettä väliaineena hydraulisissa järjestelmissä on kuitenkin yksi mahdollinen ongelma mikrobiologinen kontaminaatio, jonka vuoksi on kiinnitettävä lisähuomiota veden puhdistamisprosessiin. Kun vedestä poistetaan mikrobiologisen kasvun mahdollistamat ravintoaineet sekä muuttamalla veden lämpötilaa, saadaan mikrobiologinen kasvu hillittyä (Trostman 1996, s.54).

Vettä käytettäessä hydraulisessa järjestelmässä saadaan etuja joita ovat kyseisen väliaineen palamattomuus, yhteensopivuus työstettävien tuotteiden kanssa ja sen biohajoavuus. Palamattomuudella tarkoitetaan sitä, ettei vesi hydraulijärjestelmän väliaineena aiheuta riskiä käytettäessä sitä paloherkissä sovelluksissa. Yhteensopivuus työstettävien tuotteiden kanssa tulee esille käytettäessä vesihydraulista järjestelmää kun

on vaarana vuotavan väliaineen siirtyminen työstettävään tuotteeseen. Biohajoavuudella tarkoitetaan sitä, että mahdolliset vuodot eivät pysty saamaan aikaan pitkäaikaista maaperän tai pohjaveden saastumista. (Trostman 1996, s.159)

Veden käyttäminen väliaineena voi teettää järjestelmään korroosiota. Korroosion syntyminen järjestelmän yhdessä komponentissa saattaa saastuttaa koko järjestelmässä kiertävän väliaineen, jolloin vahinkoa syntyy kaikkialla hydraulijärjestelmässä. Korroosiota voi ilmetä esimerkiksi käytettäessä liian hapanta (alle 6,5 pH) vettä yhdessä epäsopivien materiaalien kanssa. On olemassa materiaaleja, joita käytettäessä pystytään estämään korroosion syntyminen. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi pronssi, messinki, polymeerit ja keraamit. (Trostman 1996, s.53)

Vesisuihkulaitetta käytettäessä korroosiota voi syntyä leikattavaan materiaaliin, jos sen leikkaustapahtuman jälkeisiin toimenpiteisiin ei kiinnitetä tarpeeksi huomiota. Esimerkkinä vääränlaisesta toiminnasta on vesisuihkulla työstettyjen ja kostutettujen osien huolimaton varastoiminen. Tässä tilanteessa osat ruostuisivat ja niitä pitäisi käsitellä ennen niiden seuraavaa mahdollista jatkotyöstöä.

Työskenneltäessä koneilla, jotka hyödyntävät korkeasti paineistettua nestettä, on aina olemassa suuria riskitekijöitä. Laiminlyödyt huolto- ja kunnossapito toimenpiteet saattavat altistaa koneita käyttävän työntekijän vaaratilanteille. Henkilövahinkoja voivat aiheuttaa esimerkiksi vahingoittuneista paineletkuista syntyvät holtittomasti leikkaavat suihkut. Työturvallisuuteen on siis kiinnitettävä erityistä huomiota.

Toisaalta, kuten aiemmin työssä esiteltiin, vain noin 13 prosenttia tuotetusta energiasta saadaan johdatettua leikkausprosessiin. Aina mineraaliöljyä käytettäessä kuormitetaan ympäristöä ja luontoa. Lisäksi hydraulijärjestelmissä käytetään ulkoista energialähdettä leikkaavan vesisuihkun tarvitsevan paineen aikaansaamiseksi. Vaihtoehtoinen tapa on korvata perinteinen energian tuotanto luontoystävällisemmällä tekniikalla. Mineraaliöljyllä toimiva hydraulikka voidaan toteuttaa vesihydrauliikalla ja tämän tarvitsema ulkoinen energian tarve voidaan vastaisuudessa mahdollisesti korvata käyttämällä esimerkiksi tuulivoimalla tuotettua sähköenergiaa. Veden käyttämistä hydraulijärjestelmissä on perusteltu myös luontoystävällisyydellä. Luontoystävällisyys ilmenee esimerkiksi leikkausprosessissa käytetyn veden kierrättämismahdollisuudessa. Suuressa osassa leikkaustapahtumia leikkaukseen käytetty vesi voidaan laskea suodattamisen jälkeen suoraan viemäriverkostoon. Parhaimmassa tapauksessa vesileikkurin suihkuttama leikkaava vesi voidaan kierrättää leikkauspisteessä suodattamalla neste ennen sen uudelleensyöttämistä järjestelmään.

Pelkkää vettä käytetään pääasiassa väliaineena nesteen muodostavalla suihkulla suoritettavissa leikkauksissa, mutta on myös tutkittu muita väliaineita vaihtoehtoina leikkausnesteiksi. Vesi on kuitenkin itsessään hyvä väliaine, sillä sen tiheys on suuri verrattaessa esimerkiksi öljyn tiheyteen, jolloin sen kyky saada aikaan eroosiota on verrattaessa suurempi. Tutkimuksissa, joissa on ollut päämääränä löytää leikkaavampi neste veden tilalle, on pääasiassa keskitytty kahteen asiaan. Nämä kaksi asiaa ovat nesteen koostumukseen ja stabiiliuteen vaikuttaminen, sekä vaikuttaminen muunnellun nesteen kykyyn leikata materiaalia paremmin kuin puhdas vesi. Staroselskyn ja Kimin

(1994) tutkimusten perusteella on todettu, että on olemassa tiettyjä kemikaaleja, jotka kykenevät heikentämään leikattavia materiaaleja ja tällä tavalla parantamaan leikkaustehoa. (Summers 1995, s.671) Hancox ja Brunton (1966) raportoivat, että käytettäessä pelkän veden sijaan terästä leikattaessa käyttämällä leikkausnesteinä 3,5 prosentista NaCl -liuosta, kyettiin leikkausteho nostamaan 1,8 kertaa suuremmaksi. (Summers 1995, s.673)

Rochester ja Brunton (1973) huomasivat suorittamiensa kokeiden avulla, että nesteen leikkaavuutta pystyttiin parantamaan kasvattamalla vesisuihkun tiheyttä, sekä leikkaavuutta laskemaan pienentämällä nesteen pintajännitettä. Nämä huomiot tulivat esille Merlen ja Bouixin (1993) suorittamissa leikkauskokeissa, joissa leikattiin kasviperäisillä öljyillä ruokatarvikkeita, joissa on korkea sokeripitoisuus ja konditoria tuotteita. Tämän kaltaisissa tilanteissa öljy oli vettä parempi vaihtoehto, sillä ylimääräisen kosteuden esiintyminen leikkauspinnalle saattoi tuhota leikattavan materiaalin tai ruoka-aineen rakenteen. (Summers 1995, s.671)

3.2. Vesisuihkuleikkaustekniikan sovellusesimerkkejä

Lääketieteessä vesisuihkuleikkausta on käytetty muun muassa sarveiskalvon muotoilemiseen. Eräässä tutkimuksessa vesisuihkuleikkauksen mahdollisuuksia on testattu leikkaamalla lehmän ja jäniksen sarveiskalvoja erittäin korkeapaineisella vesisuihkuleikkurilla. Sarveiskalvoja leikattiin in vivo (operoitava kohde osana elävää organismia) ja in vitro (operoitava kohde tutkimusmaljassa) menetelmillä. Näistä tutkimuksista tehdyistä havainnoista todettiin vesisuihkuleikkauksen suhteellisen pieni energian tarve silmäleikkauksen toteuttamiseen. Pinnanlaatu todettiin leikkauksen jälkeen hyväksi eikä sarveiskalvolle, linssiin tai verkkokalvolle syntynyt ylimääräistä vahinkoa. Jänisten silmillä tehdyissä kokeissa epiteelikudos parantui 48 tunnin aikana. (Ehow) Laserilla tehtävissä silmäleikkauksissa epiteelikudoksen paraneminen on kuitenkin hiukan nopeampaa. LASEK -menetelmällä (Laser Assisted Sub-Epithelial Keratomileusis) tehdyissä silmäleikkauksissa epiteelikudos paranee 24 tunnissa. LASEK -menetelmää käytetään ihmisille tehtäviin verkkokalvon muotoilemiseen näkökyvyn parantamiseksi. (NCBI)

Vuonna 2007 Nottinghamin yliopisto yhdisti voimansa Rolls Roycen, The East Midlands Development Agency-aluekehitysviraston ja Midlands Aerospace Alliance-liittouman kanssa tutkiakseen kuinka vesisuihkutekniikkaa voidaan käyttää osien työstämiseksi avaruus- ja ilmailutekniikan sovelluksissa. Tutkimuksissa painotettiin siirtymistä kaksiulotteisten osien työstämisestä kolmiulotteisten osien valmistukseen.

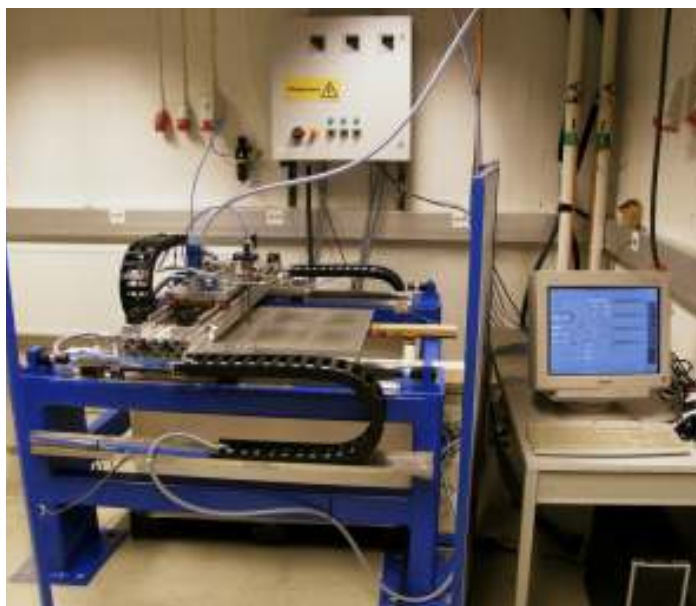
Siirtyminen monimutkaisempien osien valmistukseen, jotka soveltuisivat hyvin avaruus- ja ilmailutekniikkaan liittyviin ratkaisuihin, toteutettiin käyttämällä kuuden akselin suuntaisesti liikkuvaa vesisuihkuleikkuria. Syyt vesisuihkuleikkurin valitsemiseksi kokeisiin oli tarve pienentää kustannuksia ja halu olla luontoystävällisempi. (The university of Nottingham)

Kaliforniassa sijaitsevassa tutkimuslaitoksessa nimeltä JPL (Jet propulsion Laboratory) kehiteltiin vuonna 2001 Cryobot, joka on liikkuva robotti. Cryobot-robotin tarkoitus on helpottaa veden etsintöjä Mars-planeetalla sekä merenalaisen jään tutkimista Europa-nimisellä Jupiterin kuulla. Kummankin tutkimuskohteen tarkoituksena on selvittää löytyykö joko Marsin pohjoisnavan tai Europan merien pohjista olevasta jäästä merkkejä menneestä tai tuntemattomasta elämästä. Cryobotin liikkuminen jäässä perustuu sekä sen kykyyn sulattaa jäätä altaan että sen putkilomaiseen muotoon. (Zimmerman at al. 2001 s.1) Robotin toinen pää on painavampi, jossa sijaitsee jäänsulatin ja vesisuihkut. Tämä painavampi pää uppoaa jäähän, robotin sitä sulattaessa. Kaksi vesisuihkua mahdollistavat Cryobotin ohjattavuuden sen liikkeessä jään läpi. Robotti hyödyntää jään sulattamisesta muodostuvaa vettä, jota se pystyy keräämään ja käyttämään vesisuihkujen avulla hyödykseen. Cryobotissa olevien vesisuihkujen virtausnopeus on 10–20 metriä sekunnissa. (Zimmerman at al. 2001 s.5)

Rakennustekniikan alalla käytetty hydrodemolition-menetelmä on suhteellisen uusi metodi kovan betonirakenteen osittaiseen tai kokonaisvaltaiseen hajottamiseen. Hydrodemolition-menetelmä tarkoittaa suurella nopeudella liikkuvan vesivirran eli vesisuihkun eroosiota aiheuttavan voiman käyttämistä betonin rakenteen hajottamiseksi. Hajottamisen astetta pystytään määrittelemään siten, että työstämisestä syntyvä jälki on pienestä pintavauriosta aina suureen rakenteita pirstaloivaan jälkeen asti saavutettavissa. Kyseisellä työstämismetodilla on etuja verrattaessa perinteisiin betonin työstömenetelmiin kuten poraukseen. Eräs etu on esimerkiksi pieni mahdollisuus lisävahingon aiheuttamiseen rakenteen hajottamisen aikana. Automaatiolla toimivat rakenteiden tuhoamisprosessit takaavat ennalta arvioitavissa olevat energian kulutustasot hajotettaessa rakenteita, joilla on suuret pinta-alat. Muita hydrodemolition-menetelmän käytön tuomia etuja ovat sen hiljaisuus ja kyky sitoa muodostuva pöly täten estäen pölypilvien muodostumisen. (Hydro Pressure Corporation) Pölypilvien muodostumisen estäminen betonirakenteiden hajottamisen aikana on purkutöistä vastaavalle yritykselle suuri taloudellinen etu. Yleensä purkutöistä aiheutuu likaa, mikä saastuttaa lähialueen. Hydrodemolition- menetelmällä ei lähialueen puhdistamisesta aiheudu ylimääräisiä lisäkustannuksia.

4. TESTAUSYMPÄRISTÖN RAKENNE JA TOIMINTA

Koeympäristöön kuuluu oleellisena osana xy-pöytä. Kyseisellä pöydällä ohjataan leikkaavaa vesisuihkua eli leikkauspäätä, johon johdetaan leikkauskokeita varten korkeapaineista vettä. Veden paineistaminen vesisuihkun vaatimalle tasolle hoidetaan paineenmuuntimella ja yhdellä laboratorion pääkoneikon pumpuista. Xy-pöydän alla on vedenkeruuallas, jonka päälle on korkeussuunnassa liikkuva leikkaustaso.



Kuva 4.1 Vesisuihkuleikkausjärjestelmä.

4.1. Xy-pöytä ja sen toimintaperiaate

Xy-pöytä koostuu seuraavista osista: teräsrunko, akselien suuntaisesti liikkuvat lineaarimoottorin roottorit asennuskehysineen, lineaarimoottorien kestopagneetit, lineaarijohteet, alumiinipalkit, iskunvaimentimet ja energiansiirtoketjut. Kyseisten osien sijainnin xy-pöydässä näkee kuvasta 3.1. Kuvasta nähdään myös moottoreiden liikesuunnat x- ja y-akselien suuntaisesti siten, että x-suunta on kuvassa leveyssuunta ja y-akselien suuntainen liike tapahtuu syvyys suunnassa.

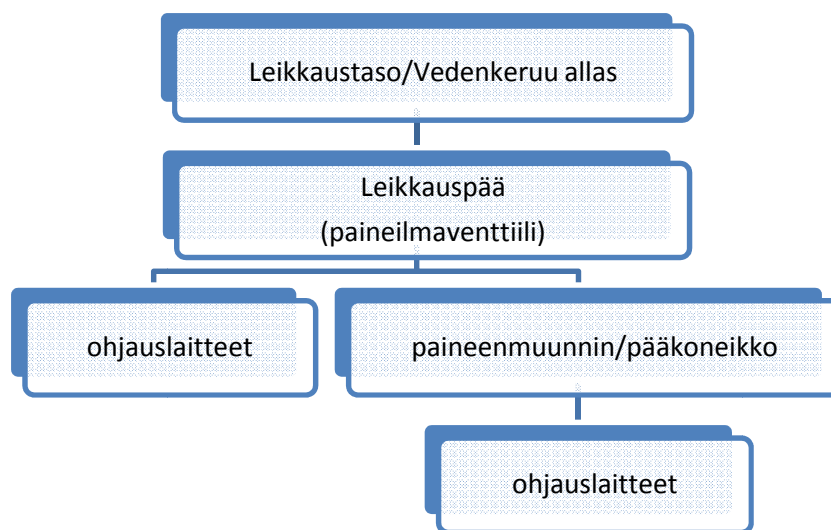
Xy-pöydän lineaarimoottorit ovat rautasydämiä, yksipuolisella magneettiradalla kulkevia moottoreita. Lineaarimoottoreissa on integroituna kaksi lämpötila-anturia ja lineaarimoottoreissa staattoreina toimivat kestopagneettilevyt. x-akselin lineaarimoottoreiden asennuskehysten päällä on moottorit yhdistävä alumiinista valmistettu palkki, jonka päälle on y-akseli.

Xy-pöydän liikkeenohjaus tapahtuu lineaarimoottoreiden sähkökäyttöjen, asema-anturien ja ohjaustietokoneen avulla. Lisäksi liikkeenohjausjärjestelmään kuuluu akselien päätyrajakytkimet. Aseman referenssiohjeet muodostetaan ohjaustietokoneessa ja niiden perusteella muodostetaan nopeusohjeet molemmille akseleille. Nopeusohjeet viedään dSpace-ohjainkortin välityksellä sähkökäyttöille, jotka ajavat lineaarimoottoreita ohjeiden perusteella. Asema-antureita käytetään takaisinkytkentänä sekä sähkökäyttöillä tapahtuvaan nopeudensäätöön, etteivät lineaarimoottorit liiku liikealueensa ulkopuolelle. (Pihlainen 2009, s.48)

Xy-pöydän lineaarimoottoreita varten on servovahvistin eli Unidrive sähkökäyttö. Nopeusohjeet viedään Unidrivelle dSpace-ohjainkortin avulla analogisen $\pm 10V$ analogiaohjeena (Pihlainen 2010, s.59). Rajoittamalla suurinta ohjausjännitettä rajoitetaan akselien maksimi liikenopeutta. Unidriveen parametreissa akselien maksiminopeudeksi on asetettu 2,5 metriä sekunnissa. Tämä nopeus saavutetaan ohjausjännitteen arvolla 10 voltia. Jos ohjausjännite rajoitetaan esimerkiksi arvoon 5 voltia, on akselin maksimi nopeus 1,25 metriä sekunnissa. Lineaarimoottoreilla aikaan saatu maksimi akselin suuntainen nopeus, ohjausjännitteen ollessa kuusi voltia, on 1,5 metriä sekunnissa. (Pihlainen 2010, s.63)

4.2. Vesisuihkuleikkausjärjestelmän rakenne

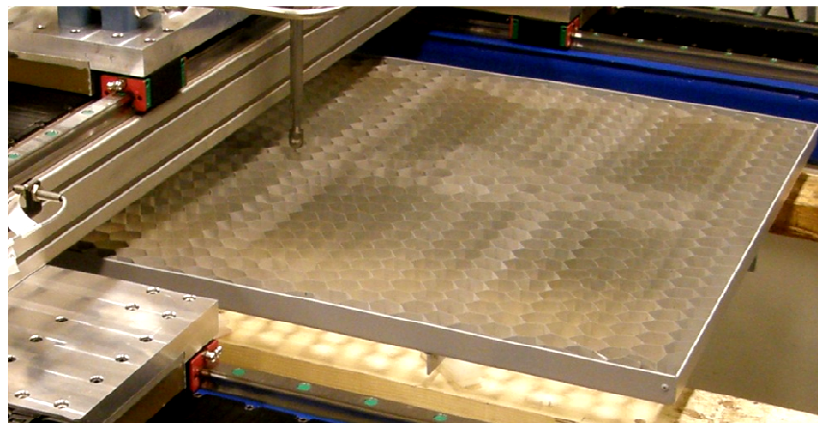
Vesisuihkuleikkausjärjestelmän tehtävänä on saada aikaa halutun kokoinen ja paineinen vesisuihku, jolla pystytään leikkaamaan materiaalia säädetyn etäisyyden päästä. Tämän kaiken aikaansaamiseksi tarvitaan paineenmuunnin/pääkoneikko, vesisuihkun muodostava leikkauspää, ohjauslaitteet, leikkaustaso ja leikkausväliaineena käytettävää vettä. Kuvassa 4.2 ilmenevät vesisuihkuleikkausjärjestelmän osat ovat esiteltyinä tarkemmin seuraavissa kappaleissa.



Kuva 4.2. Leikkausjärjestelmään liittyvät kokonaisuudet.

4.2.1. Leikkaustaso ja vedenkeruuallas

Leikkausaltaana käytetään muovilaatikkoa, jonka pituus on yksi metri ja leveys on 1,2 metriä. Muovilaatikon pohjassa on hana, jonka avulla laatikkoon kerääntyvän leikkauksesta syntyvän veden voi poistaa. Muovilaatikkoon yläpuolella on leikkaustaso, jonka päälle leikattava materiaali voidaan asettaa. Leikkaustaso ja siinä oleva tukikehikko on esitelty kuvassa 4.3. Leikkaustasoon kuuluu kehikko ja sen päällä oleva taso. Leikkaustason pinnan muodostaa alumiininen kennolevy, jonka päälle leikattava materiaali leikkauskokeita suoritettaessa asetetaan.



Kuva 4.3. Leikkaustaso ja tukikehikko.

Leikkaustason alumiinilevyn rakenne mukailee mehiläiskennon rakennetta. Leikkausetäisyyttä säädetään leikkaustason korkeuden avulla. Leikkaustason korkeuden säätäminen hoidetaan yhden senttimetrin paksuisilla elementeillä, joita lisättiin aina kun korkeutta haluttiin vähentää. Leikkaustason korkeuden hienosäätö toteutettiin kahden millimetrin paksuisilla muovilevyillä, joiden määrän avulla voidaan leikkaustason korkeutta hienosäätää.

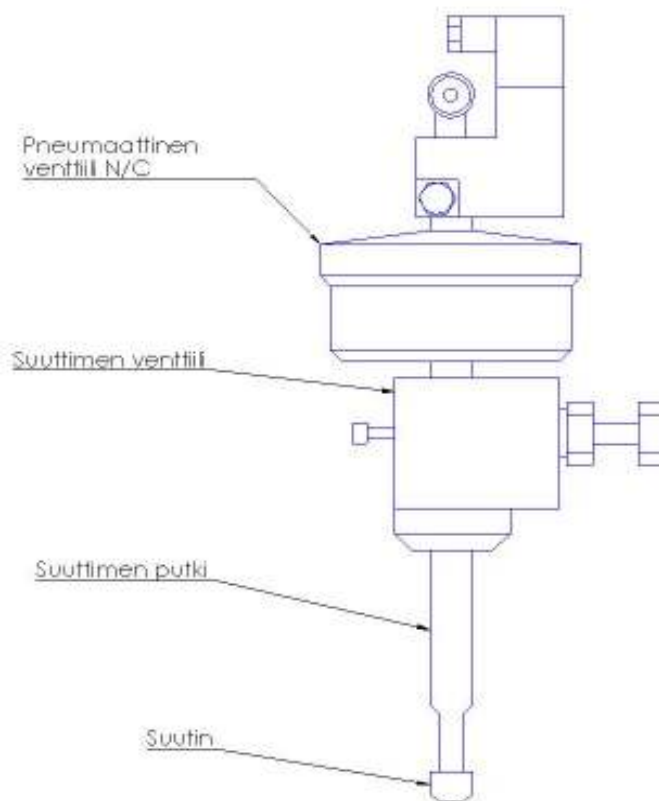
4.2.2. Paineenmuunnin ja pääkoneikko

Vesisuihkuleikkausjärjestelmässä käytetään Dynasetin HPW 1600/15-130-paineenmuunninta. Kyseisen paineenmuuntimen maksimi paine on 1600 baria ja sen muuntokerroin on 7.87. Paineenmuuntimeen johdettaessa painetta suuruudella 200 baria, saadaan muuntokertoimen avulla laskettua, että leikkauspäälle ohjautuu muunneltu 1600 barin paine. (Dynaset)

Pääkoneikon pumpulla luodaan painetaso ja tilavuusvirta, jotka johdetaan paineenmuuntimelle. Lopullinen leikkauspaine määräytyy pääkoneikolle asetetun paineen arvon ja paineenmuuntimen muuntokertoimen mukaan.

4.2.3. Leikkauspää

Vesisuihkuleikkausjärjestelmän leikkauspää on KMT Waterjet systems:n Aqualine I-puhdasvesileikkauspää. Aqualine I-puhdasvesileikkauspään suihkua ohjaavaa neulaventtiiliä käytetään normaalisti suljetulla N/C paineilmaventtiilillä. (Kmtgroup) Kuvassa 4.4 nähdään leikkauspään rakenne sekä leikkauspää asennettuna kiinni xy-pöytään.



Kuva 4.4. Aqualine-puhdasvesileikkauspää ja sen osat.(Kmtgroup)

4.2.4. Leikkauksissa käytettävä vesi

Vesisuihkuleikkurin käyttämä vesi johdetaan huoneeseen vesijohtoverkoston kautta. Veden laatu vaatimuksille ei ole asetettu erityisiä vaatimuksia, ennen sen paineistamista. Vesi täytyy kuitenkin suodattaa ennen sen johtamista leikkauspäähän. Järjestelmään tuotu vesi suodatetaan korkeapainesuodattimella, joka on KMT Waterjet Systems:n HP linjasuodatin.

4.2.5. Ohjauslaitteet

Vesileikkausjärjestelmässä ohjataan kahta eri laitetta, jotka ovat leikkauspäässä oleva pneumaattinen venttiili ja paineenmuuntimen venttiili. Pneumaattinen venttiili on

normaalisti kiinni. Tämän seurauksena leikkauspään läpi ei virtaa nestettä ilman jännitteen arvon muuttamista. Kytkimen asentoa vaihdettaessa pneumaattinen venttiili avautuu ja vesi virtaa leikkauspään läpi. Toisella ohjauslaatikossa olevalla kytkimellä vapautetaan paineen kulku paineenmuuntimelta leikkauspäähän. Ohjauslaatikossa on myös virtakytkin, laboratorion pääkoneikon sammuttamiseksi.

5. KÄYTETYT MITTAUSMENETELMÄT

Yleisesti on tiedossa, että suurella leikkauspaineella on mahdollista vesisuihkuleikata lähes kaikenlaisia materiaaleja. Tietoa kuitenkin puuttuu siitä kuinka pienellä paineella ja vesisuihkun liikkeen nopeudella, materiaaleja pystytään vielä leikkaamaan. Leikkauskokeiden tarkoituksena on löytää yhteyksiä leikkausparametrien muutoksien ja niillä saatavien erikokoisten leikkausurien välille. Tärkeää on löytää myös erilaisille materiaaleille toimivia ja taloudellisia leikkausnopeuksia ja -paineita.

5.1. Leikkauskokeiden suorittaminen

Leikkauskokeet suoritettiin hydrauli- ja automaatiotekniikan laitoksen raskaslaboratoriossa. Leikkauskokeilla selvitettiin kuinka hyvin pystytään eri tilanteissa tietyillä leikkauspaineilla, -nopeuksilla, -etäisyyksillä ja suuttimilla vesisuihkua käyttämällä leikkaamaan valittuja materiaaleja. Erilaisilla leikkausparametrien kombinaatioilla saatujen leikkausurien tarkasteleminen oli työn kannalta olennaista. Leikkausuran ylemmän ja alemman osien leveydet, alueiden joissa vesisuihku osuu ja poistuu leikattavasta materiaalista, olivat oleellisia tarkastelua vaativia kohteita. Kokeissa tarkasteltiin myös miten leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet ovat suhteessa toisiinsa.

Leikkauskokeissa vesisuihku ajettiin suoraa linjaa pitkin yli leikattavien materiaalien kuudella eri leikkausnopeudella, kahdella eri leikkauspaineella ja -etäisyydellä sekä kahta eri suutinkokoa käyttämällä. Suoritettavissa kokeissa erilaisilla rataohjauksilla saatavat leikkausprofiilit eivät olleet tarkastelussa.

Leikkauskokeista kerättiin talteen leikkauspöydän dSpace-ohjelmalla ohjelmoidun käyttöjärjestelmän tarjoamat kuvaajat, joista varmistettiin käytetyt leikkausnopeudet. Eri leikkaustilanteista kerättiin talteen myös valokuvat, jotka otettiin mikroskoopilla leikatun materiaalin leikkauspinnoista. Kuvista oli mahdollista nähdä kuinka hyvin eri tehoiset vesisuihkut leikkaavat valittua materiaalia syvyyden ja leveyden osalta. Kuvista nähtiin leikkausuran leveys ja syvyys sekä leikkausuran kaltevuuden kulma. Leikkauskokeiden avulla tukittiin myös leikkauspintojen laadun tasoa eli karheutta ja nähtiin syntykö vesisuihkuleikkaamisessa leikkauspintaan toistuvaa aaltomaisuutta.

Tämän työn vesisuihkuleikkauskokeissa käytetyllä tekniikalla voitaisiin aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.1. Leikkauspää ja leikkauspään suutin) esitetyn useamman suuttimen samansuuntainen kuljettaminen toteuttaa. Tätä kokeiltaisiin ajamalla vesisuihkun leikkauspää useamman kerran samaa rataa pitkin materiaalin yli. Tämän toteuttaminen kuitenkin vaatisi materiaalin pitämisen täysin paikallaan

leikkaustasolla, joka on hankala toteuttaa käytettävissä olevilla varusteilla. Useamman suuttimen samansuuntainen leikkausteho ei ole tässä työssä näiden asioiden takia tarkastelussa.

5.2. Leikkauskokeissa käytettävät leikkausparametrit

Leikkauskokeisiin valittiin niissä käytettävät leikkauspaineet, -nopeudet, -etäisyydet ja leikkauspään suuttimet siten, että kokeista saatu tieto olisi mahdollisimman informatiivista ja suuntaa antavaa jatkotutkimuksia varten. Tämän aikaansaamiseksi valittiin toisistaan mahdollisimman poikkeavia leikkausparametrien arvoja, joilla pystyttiin tutkittavaa materiaalia leikkaamaan tarvittavan tutkimusaineiston aikaansaamiseksi.

Leikkauskokeissa päätettiin käyttää kahta eri leikkauspainetta toteutettavien leikkauksien aikana. Painetasoiksi valittiin 1000 baria ja 1600 baria. Kyseiset leikkauspaineet valittiin, koska tiedettiin, että alle 1000 baria pienemmällä paineella ei pystyttäisi leikkaamaan ongelmitta kaikkia tutkimuksen kohteina olevia materiaaleja. Kun leikkauspaine on yli 1600 baria, pystytään lähes ongelmitta leikkaamaan kokeisiin valittuja materiaaleja. Leikkauspaineen muutoksen vaikutus pystytään erottamaan leikkausurasta, kun käytettävät leikkauspaineet eroavat huomattavasti toisistaan.

Leikkauskokeissa käytettiin porrastettuja eri leikkausnopeuksia haluttujen mittaustulosten aikaan saamiseksi. Ensimmäinen leikkaus suoritettiin tietyllä vakio nopeudella. Seuraavat viisi leikkausta suoritettiin aina nopeuden 0,25 metriä sekunnissa verran suuremmalla leikkausnopeudella. Vakio nopeudella tuotetusta leikkausjäljestä on varmempaa todeta käytetyllä leikkausnopeudella aikaan saatu leikkausuran laatu. Käytettäessä kiihtyvää leikkausnopeutta ei voida olla täysin varmoja leikkausnopeuden suuruudesta, jonka aikana kyseinen leikkausuran tutkimuksen alainen kohta on tuotettu.

Yhdeksi leikkausparametriksi valittiin leikkausetäisyys eli suuttimen etäisyys leikattavasta materiaalista. Leikkausetäisyyden eli etäisyyden muuttuessa vesisuihkun ja materiaalin välillä on odotettavissa leikkaustehon muuttumista ja leikkausuran leveyden vaihtelua pienemmäksi sekä suuremmaksi. Leikkausetäisyyksinä leikkauskokeissa käytettiin 10 millimetriä ja 21 millimetriä. Leikkauspinnan etäisyyksiksi valittiin kaksi arvoa, joista suurempi on pienempään nähden kaksinkertainen havainnollistavampien leikkaustuloksien aikaansaamiseksi. Pienemmän valitun arvon ansiosta leikkaukset suoritettiin vesisuihkun alkuvaihealueella. Suurempi arvo valittiin taas siten, että varmennettiin liikkuminen vesisuihkun alueella, missä veden dynaaminen paine alkoi hiljalleen laskea. Jälkimmäinen etäisyyden arvo, missä dynaaminen paine alkaa laskea, saatiin kertomalla käytetyn suuttimen halkaisija sadalla. Tämän vesisuihkun alueen määrittäminen, missä dynaaminen paine alkaa hiljalleen laskea esiteltiin diplomityön alkupuolella (luku 2.4. Vesisuihkun ominaisuudet).

Leikkauspäässä oleva suutin määrää vesisuihkun materiaaliin kohdistavan leikkaavan alueen pinta-alan. Leikkaavan suihkun pinta-alan muuttuessa pienemmäksi leikkauspaineen pysyessä muuttumattomana saadaan aikaan suurempaa nopeutta virtaava vesisuihku. Suuttimen koon ja sen aikaansaaman vesisuihkun nopeuden välinen

suhde esiteltiin aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.1. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin). Leikkauskokeissa käytettiin kahta toisistaan huomattavasti poikkeavaa suutinta, joiden koot olivat 0,18 millimetriä ja 0,25 millimetriä. Pienempi halkaisijaltaan 0,18 millimetrin suutin valittiin, sillä se on yksi pieni kokoisemmista suuttimista, mikä on mahdollista asentaa leikkauskokeissa käytettyyn leikkauspäähän. Suurempi suutin on taas kokoa 0,25 millimetriä ja tämä on pinta-alaltaan kaksi kertaa suurempi verrattaessa toiseen valittuun suuttimeen. Jos pinta-alan sijaan suuttimen halkaisija kaksinkertaistettaisiin, vesisuihkun teho olisi huomattavasti suurempi. Valittaessa toisistaan eroavat suuttimet saadaan aikaan toisistaan poikkeavia leikkaustuloksia, joista nähdään selvästi syy-seuraussuhteet leikkausparametrien ja niillä saatujen tuloksien välillä.

Tutkittavien leikkausparametrien lukumäärä oli leikkauskokeita varten järkevää rajata siten, että niiden avulla saatiin oleellista tietoa tutkittavalta alueelta. Leikkausparametrien valitsemisen epäonnistuessa oli vaarana saada suuri määrä epäolennaista tietoa, jonka sekaan oleelliset tutkimustulokset saattaisivat hukkuu ja siten jäädä ilman tarpeellista huomiota. Taulukkoon 5.1 on kerätty tässä kappaleessa esitellyt leikkausparametrit ja niiden arvot, joita myös käytettiin suoritetuissa leikkauskokeissa.

Taulukko 5.1. leikkauskokeissa käytettävistä parametreista ja niiden lukumääristä.

Leikkausparametri	Lukumäärä	Kokoluokka
leikkauspaine	2	1000 ja 1600bar
leikkausnopeus	6	(0.25,0.50,0.75,1.0,1.25,1.5) m/s
leikkausetäisyys	2	10mm ja 21mm
suutin	2	0.18mm ja 0.40mm

5.3. Leikattavat materiaalit

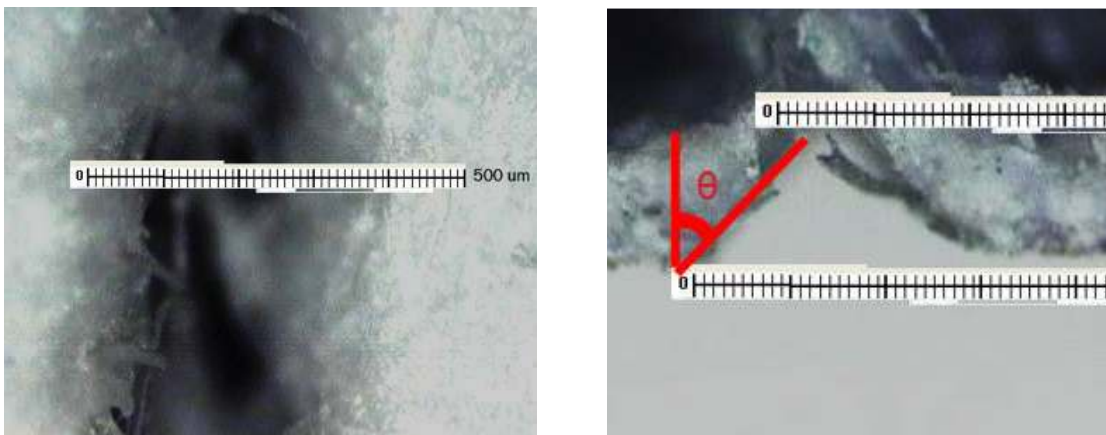
Leikkauskokeiden tarkoituksena oli löytää kokeissa käytetyille materiaaleille toimivat ja taloudelliset leikkausnopeudet ja -paineet. Ottaen huomioon, että kokeissa leikataan vain pelkkää vettä leikkausnesteinä käyttävää vesisuihkuleikkuria, on materiaalien valinnoissa rajoituksia. Pelkällä vedellä on esimerkiksi liian hidasta leikata paksuja ja tiheitä materiaaleja, kuten eri kivilaadut tai metallit. Leikkauskokeissa päätettiin käyttää materiaalina kolmea eri vahvuuksista paperia ja yhden mallista aaltopahvia

Leikattavien materiaalien ollessa keskenään mahdollisimman samankaltaisia saadaan aikaan myös keskenään vertailtavia mittaustuloksia. Valittaessa leikattaviksi kappaleiksi toisistaan täysin poikkeavia materiaaleja, eivät saadut mittaustulokset olisi tarpeeksi havainnollisia. Leikattavien materiaalien pysyessä samana, pelkästään niiden vahvuuksien eli paksuuksien muuttuessa, saadaan aikaan keskenään verrattavissa olevaa mittaustietoa. Kolme neljästä valituista leikkausmateriaaleista ovat eri vahvuisia paperilaatuja. Valitut paperit ovat neliömassaltaan 80g/m², 112 g/m² ja 224 g/m². Paperien vahvuudet niiden paksuuksien osalta ovat järjestyksessä: 0,15 millimetriä, 0,2

millimetriä ja 0,27 millimetriä. Neljänneksi leikattavaksi materiaaliksi valittiin aaltopahvi, joka poikkeaa materiaalina tavallisesta paperista. Aaltopahvi koostuu kolmesta kerroksesta, joista keskimmäinen on aseteltu materiaalin nimen mukaisesti aaltomaiseen muotoon. Leikattavana materiaalina se on mielenkiintoinen, sillä on vaikea arvioida miten leikkaava vesisuihku reagoi aaltopahvin kolmekerroksiseen rakenteeseen. Valitun aaltopahvin neliömassa on 291 g/m^2 ja sen paksuus on 3,0 millimetriä.

5.4. Leikkausuran tarkastelu mikroskoopilla

Kun valitut materiaalit oli leikattu vesisuihkulla, ne annettiin rauhassa kuivua. Tämän jälkeen jokaisessa materiaalissa olevat leikkausurat kuvattiin mikroskoopilla. Käytetty mikroskooppi oli merkiltään Nikon ja siihen oli asennettu Hitachin digitaalinen videokamera, jonka avulla saatiin kuvattua tutkimuksen alaisena olevat leikkausurat. Digitaalisten kuvien suurennos on 50ertainen ja niihin saatiin lisättyä mitta-asteikko, joka mahdollisti kuvissa olevien leikkausurien leveyden ja laadun tarkastelun. Eri papereissa olevat leikkausurat kuvattiin paperin päältä samasta suunnasta, josta leikkaava vesisuihku oli iskeytynyt materiaaliin. Papereissa olevien leikkausurien ylemmän ja alemman osan leveydet pystyttiin laskemaan ylhäältäpäin otetuista valokuvista, sillä leikkausmateriaaleiksi valitut paperit olivat ohuita. Materiaalin ollessa ohutta pystyttiin leikkausuran päältä otetusta kuvasta näkemään selvästi leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet. Mikroskoopilla otettiin kuvat myös leikkausprofiileista, joista nähtiin leikkausurien kaltevuuden kulmat. Kuvattaessa mikroskoopilla aaltopahvissa olevia leikkausuria, otettiin kuva pahvin ylä- sekä alapuolelta. Pahvi oli paperia paksumpi koemateriaali, joten siihen muodostuva leikkausura oli huomattavasti syvempi. Ylhäältä päin kuvaavaa mikroskooppia ei tämän takia pystytty tarkentamaan leikkausuran sisään siten, että samanaikaisesti pystyttäisiin näkemään leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet.



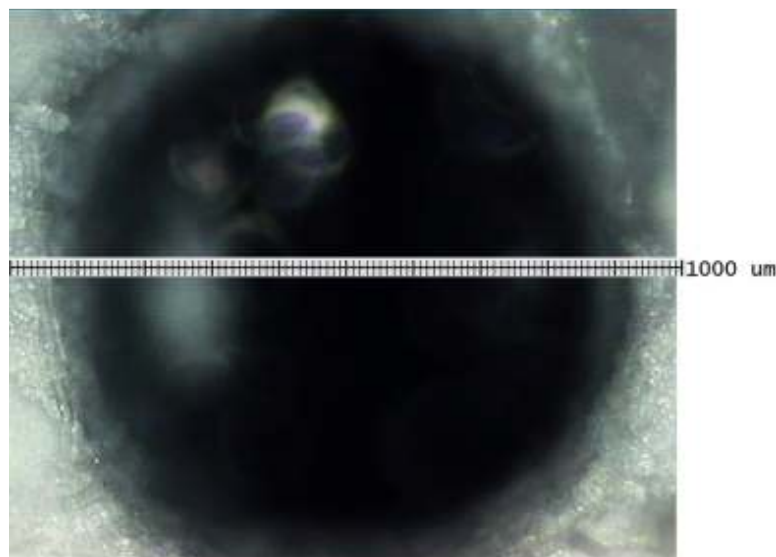
Kuva 5.1. 80 g/m^2 paperissa olevan leikkausura vesisuihkun tulosuunnasta ja sivusta.

Kuva 5.1 on esimerkki kuva leikatusta materiaalista otettujen mikroskooppikuvien analysoimisesta. Esimerkkikuvassa 5.1 on kyseessä 80 g/m^2 neliö massaltaan oleva paperi, jota on leikattu leikkausnopeudella 0,5 metriä sekunnissa, 1000 barin paineella, 10 millimetrin leikkaus etäisyydellä ja 0,18 millimetrin kokoisella suuttimella. Leikkausuran tarkastelussa olevat parametrit esiteltiin tarkemmin diplomityön alkupuolella (luku 2.3. Leikkausuravaihtoehdot) kuvassa 2.4 ja 2.5. Kuvassa 5.1 näkyvän mitta-asteikon kahden paksumman tumman viivan väli on 0,1 millimetriä. Kuvassa 5.1 on esitelty myös kaltevuuden kulma θ , joka laskettiin seuraavassa kappaleessa esitettäviä mittaustuloksia varten kaavalla (2).

5.5 Vesisuihkun energiatheyden mittaaminen

Vesisuihkun hajoamisen mittaamiseksi ja todistamiseksi toteutettiin lisäleikkauskokeita. Hajoamisen todistamiseksi leikattiin paperiin, jonka neliömassa on 224 g/m^2 reikiä vaihtelevilla leikkausetäisyyksillä. Kattavan mittaustiedon aikaansaaminen osoittautui hankalaksi leikkaustason korkeuden säätämisen porrastusmekanismiin takia.

Leikkaustuloksia saatiin aikaan viidellä eri leikkausetäisyydellä, jotka olivat 2, 9, 13, 20 ja 39 millimetriä. Materiaaliin leikattujen reikien toisiinsa vertaamisen tasavertaiseksi tekeminen toteutettiin niitä kutakin leikkaamalla neljän sekunnin ajan. Jokaisella eri leikkausetäisyydellä leikattiin valittuun materiaaliin kolme reikää, joiden halkaisijoille laskettiin keskiarvo. Tämä saatu halkaisijan keskiarvo ilmoitti kuinka suureksi vesisuihkun halkaisija oli kasvanut käytetyllä leikkausetäisyydellä. Kuvassa 5.2 on esimerkkikuva yhdestä vesisuihkulla leikatusta reiästä ja sen halkaisijan laskemisesta.



Kuva 5.2. Vesisuihkun leviämisen osoittamiseksi leikattu reikä ja sen mittaaminen.

Energiatiheyden laskemiseksi tarvittiin vesisuihkun hajoamisen lisäksi määritettyä vesisuihkun teho. Vesisuihkun teho laskettiin vesisuihkun tilavuusvirran, painetason ja kaavan (4) avulla. Tilavuusvirta mitattiin vesisuihkulle laboratoriossa käyttäen apuna aikaa, jossa vesisuihku täytti puolen litran astian.

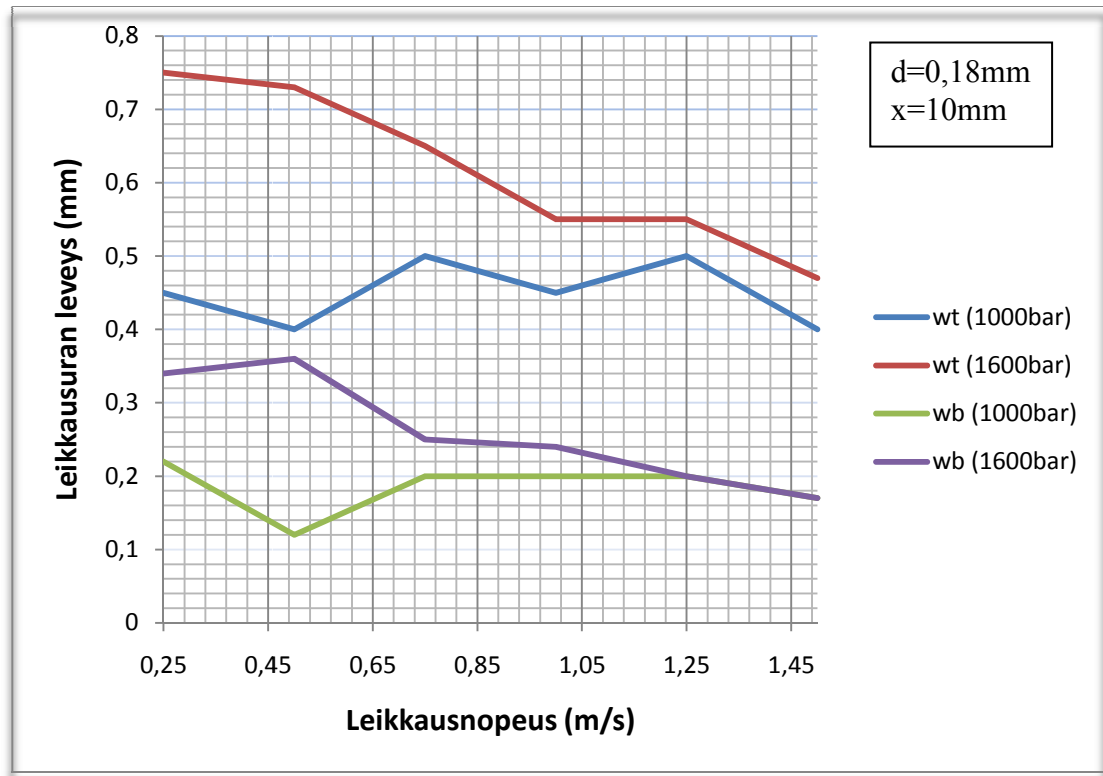
6. MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

Seuraavissa kolmessa alakappaleessa (luvut 6.1., 6.2. ja 6.3) esitellään, minkälaisia leikkausuria leikkauskokeissa muodostui leikkausparametreja muunneltaessa. Leikkauskokeista saadut mittaustulokset esitellään materiaaliakohtaisesti kuvaajien avulla. Kuvaajissa esitellään leikkausuran ylä- ja alaosan leveyden arvot eri leikkausnopeuksilla. Leikkausuran ylemmän osan ilmoittaa kuvaajissa esiintyvä lyhenne w_t ja alemman osan ilmoittaa lyhenne w_b . Eri leikkaustilanteista esitellään myös leikkausuran kaltevuuden kulman θ arvot eri leikkausnopeuksilla.

Jokaisessa tehdyssä kokeessa on aina huomioitu muuttuva leikkausnopeus. Muuttuvan leikkausnopeuden aikana ovat tarkastelussa joko kahdella eri leikkauspaineella saadut leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet tai sitten näillä leikkauspaineilla saadut leikkausuran kaltevuuden kulmat. Jokaista leikattavaa pehmeää materiaalia varten toteutettiin leikkaustilanteet, joissa muutettavia leikkausparametreja olivat leikkauspaine p , suuttimen halkaisija d ja leikkausetäisyys x .

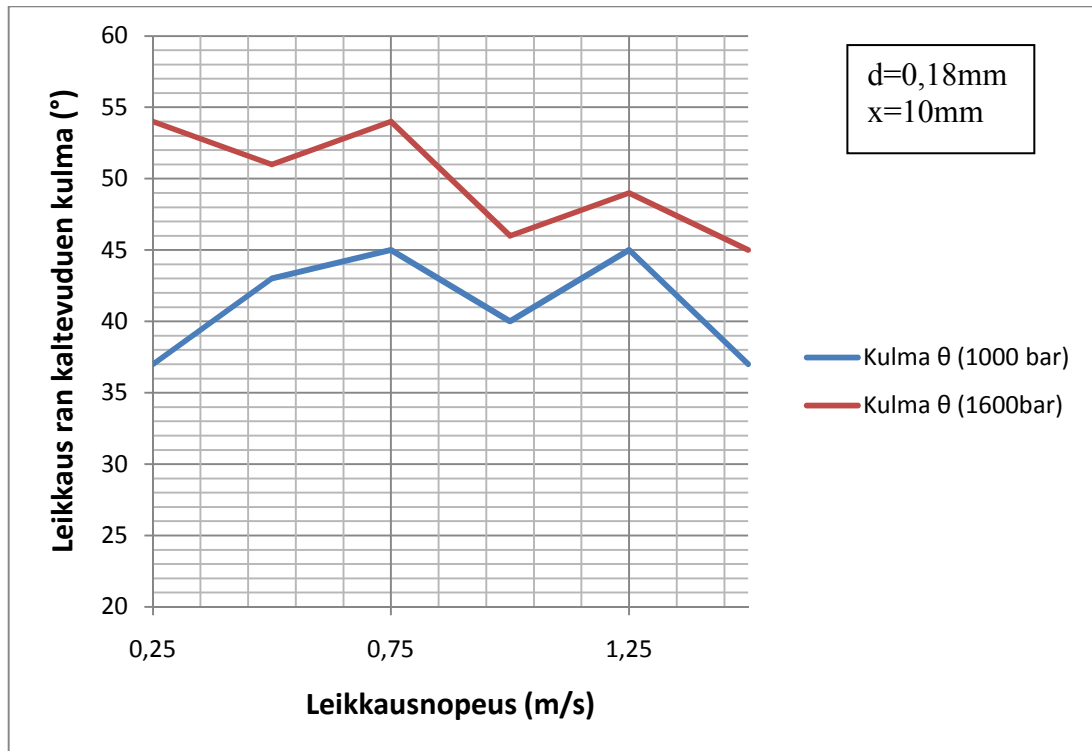
6.1. Paperin 80g/m^2 leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi

Seuraavissa kuvissa 6.1 - 6.8 on esitelty leikkauskokeissa saatuja mittaustuloksia. Kuvaajat esittelevät neliömassaltaan 80 g/m^2 paperin leikkaamisesta saatuja tuloksia. Kuvissa esitellään leikkausurien piirteitä, jotka saadaan aikaan muuttamalla leikkausnopeutta, -painetta, -etäisyyttä ja suuttimen kokoa. Kuvat esittelevät kokonaisuudessaan tulokset, jotka saadaan aikaan eri leikkausparametrien kombinaatioilla.



Kuva 6.1. Leikkausurien leveydet leikattaessa 80 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Leikkauspaineen muutoksen vaikutus tulee esille edellä olevasta kuvasta 6.1, jossa esiintyvistä käyristä nähdään, että varsinkin pienemmillä leikkausnopeuksilla leikkauspaineen kasvattaminen 1000 barista 1600 baariin saa leikkausuran leveyden kasvamaan. Kasvattamalla leikkauspainetta saadaan aikaan tehokkaampi vesisuihku. Aikaisemmin esitellyn (luku 2.4. Vesisuihkun ominaisuudet) kaavan (2) mukaan vesisuihkun suuttimen kohdalla vaikuttava dynaaminen paine on suoraan verrannollinen tietyn leikkausetäisyyden päässä vaikuttavaan dynaamiseen paineeseen. Kasvatettaessa vesisuihkun dynaamista painetta saadaan aikaan tehokkaampi vesisuihku, jonka avulla pystytään leikkaamaan materiaalia suuremmalta alueelta. Tämän suuremman tehon ja sen kautta energiantiheyden kasvamisen ansiosta myös aikaan saatu leikkausura on leveämpi. Leikkausura leveni leikkauspainetta nostettaessa varsinkin tässä koetilanteessa, jossa leikattiin kokeissa käytettävistä materiaaleista haurainta eli neliömassaltaan 80 g/m^2 olevaa paperia.

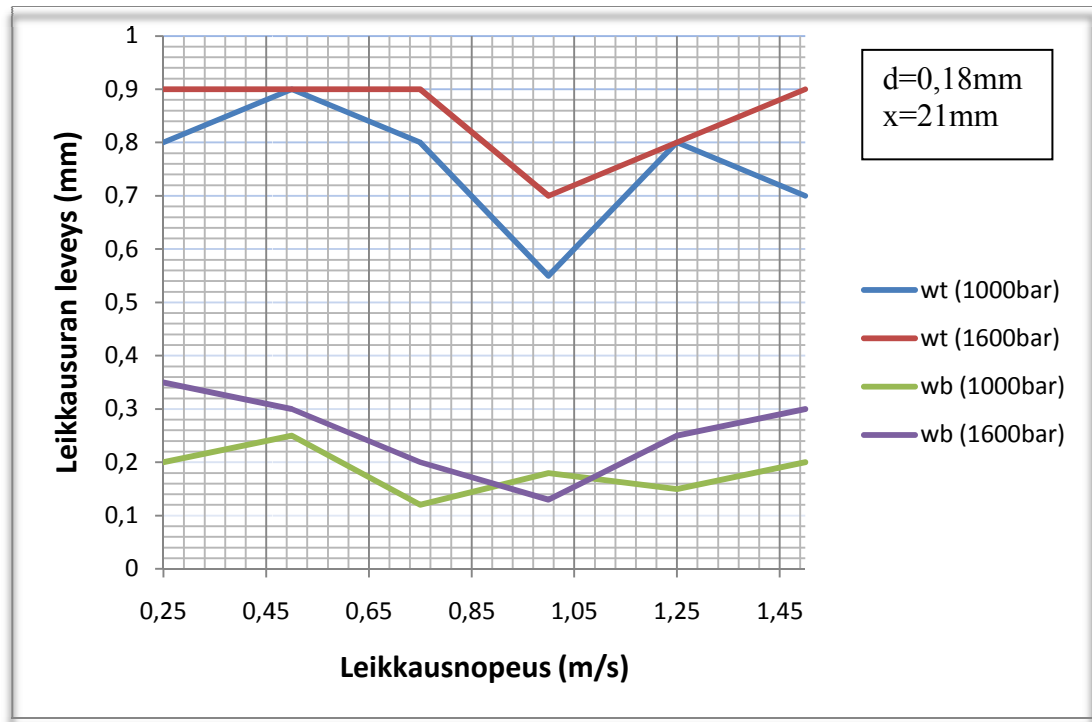


Kuva 6.2. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa paperia 80g/m^2 1000 ja 1600 barin painetasoilla

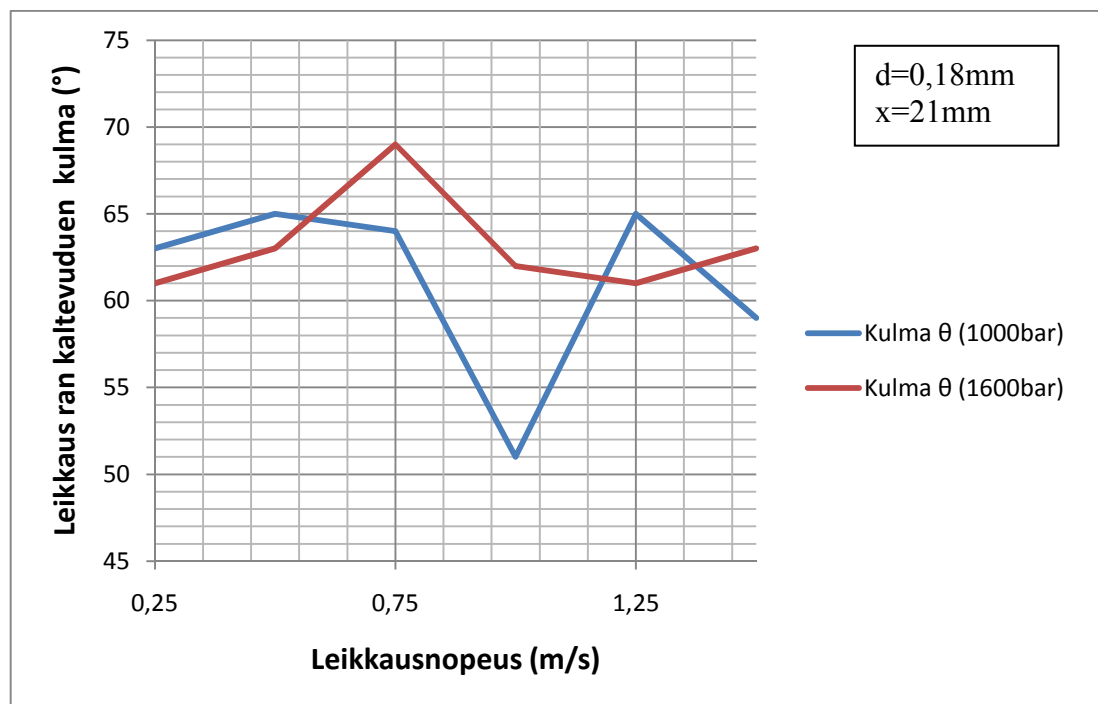
Leikkausuran kaltevuuden kulman muuttuminen leikkauspainetta nostettaessa nähdään kuvista 6.2 ja 6.6. Kuvien tapauksissa kaltevuuden kulmat pienentyvät käytettäessä suurempia leikkausnopeuksia. Suurempia leikkausnopeuksia käytettäessä jää leikkaavalle vesisuihkulle vähemmän aikaa kuluttaa materiaalin pintaa, johon tämän takia muodostuu kapeampi leikkausuran ylempi osa. Leikkausuran kaltevuuden kulma on pienempi tilanteessa, jossa leikkausuran ylemmän osan leveys on lähellä leikkausuran alemman osan leveyttä.

Vaihdettaessa suuttimen halkaisija suurempaan kokoon eli 0,25 millimetriin, saadaan aikaan leveämpi leikkausura sekä sen ylemmästä että alemmasta osasta. Kuvia 6.1 ja 6.5 vertaamalla kuviin 6.3 ja 6.7 nähdään miten leikkausura on levinnyt suuttimen vaihtamisen ansiosta. Suuremmalla suuttimella saadaan aikaan tehokkaampi ja leveämpi vesisuihku, jolla muodostuva leikkausura on myös leveämpi.

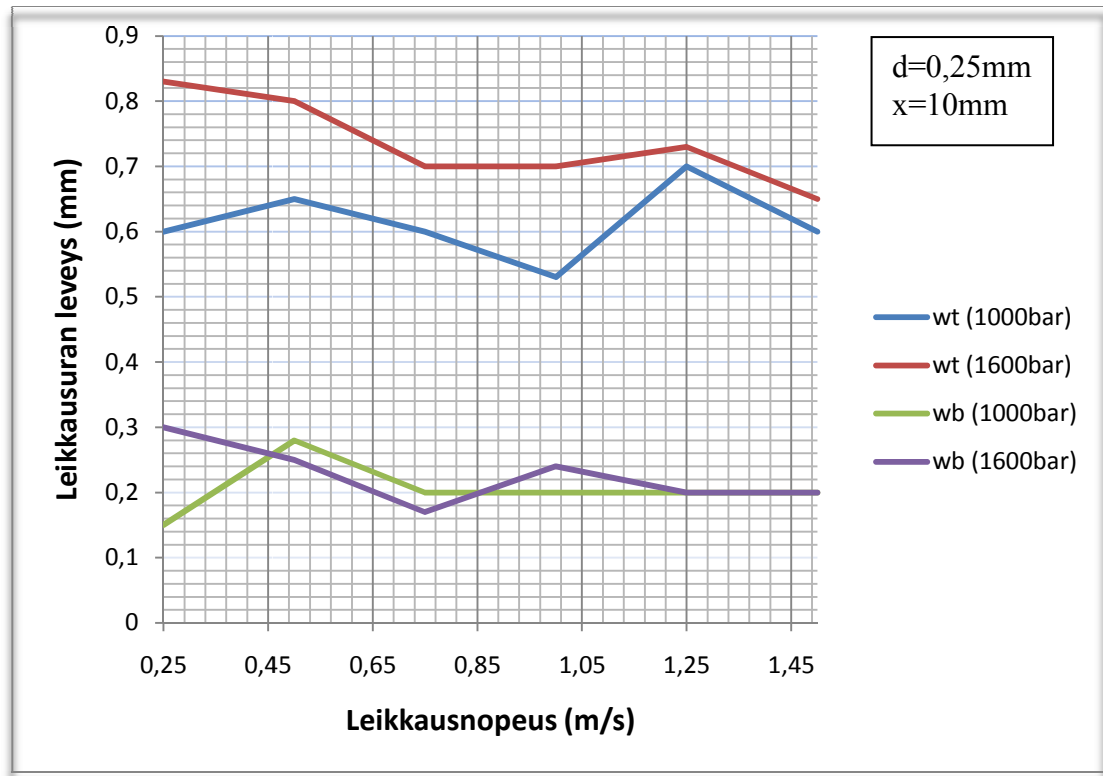
Suurempaa suutinta käytettäessä voidaan kuvaa 6.5 vertaamalla kuvaan 6.7 nähdä, että leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet muuttuvat vähemmän eri leikkausnopeuksilla. Kookkaammalla suuttimella aikaan saatu suurempi teho muodostaa eri leikkausnopeuksilla yhtä leveän leikkausuran.



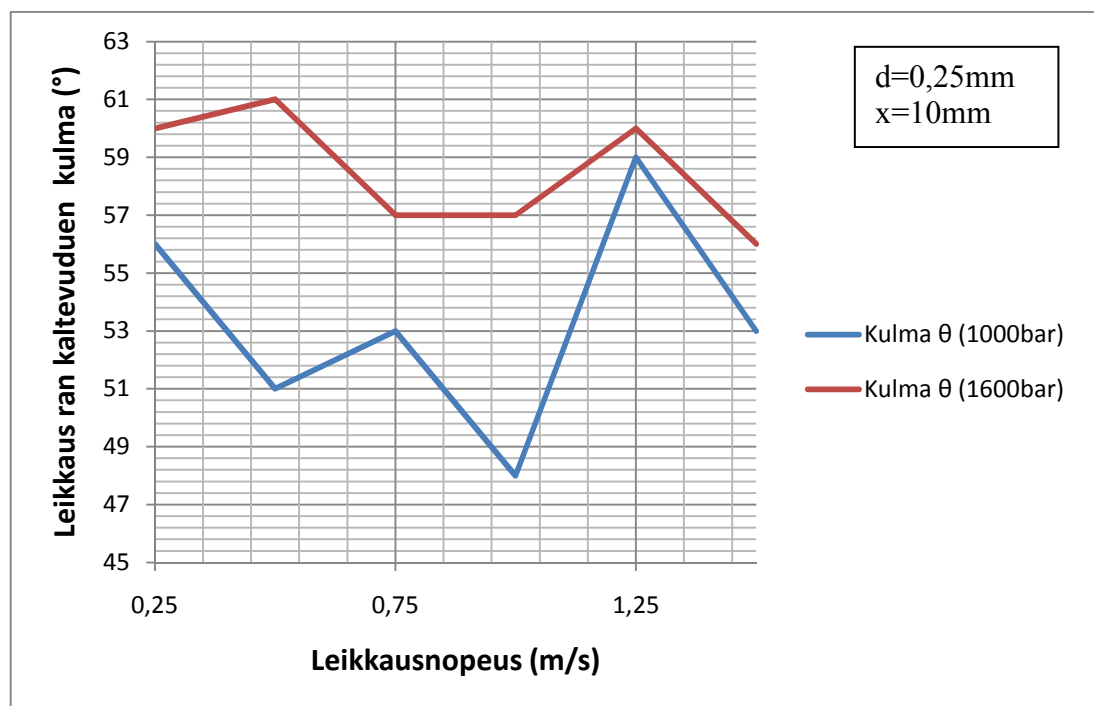
Kuva 6.3. Leikkausurien leveydet leikattaessa 80 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



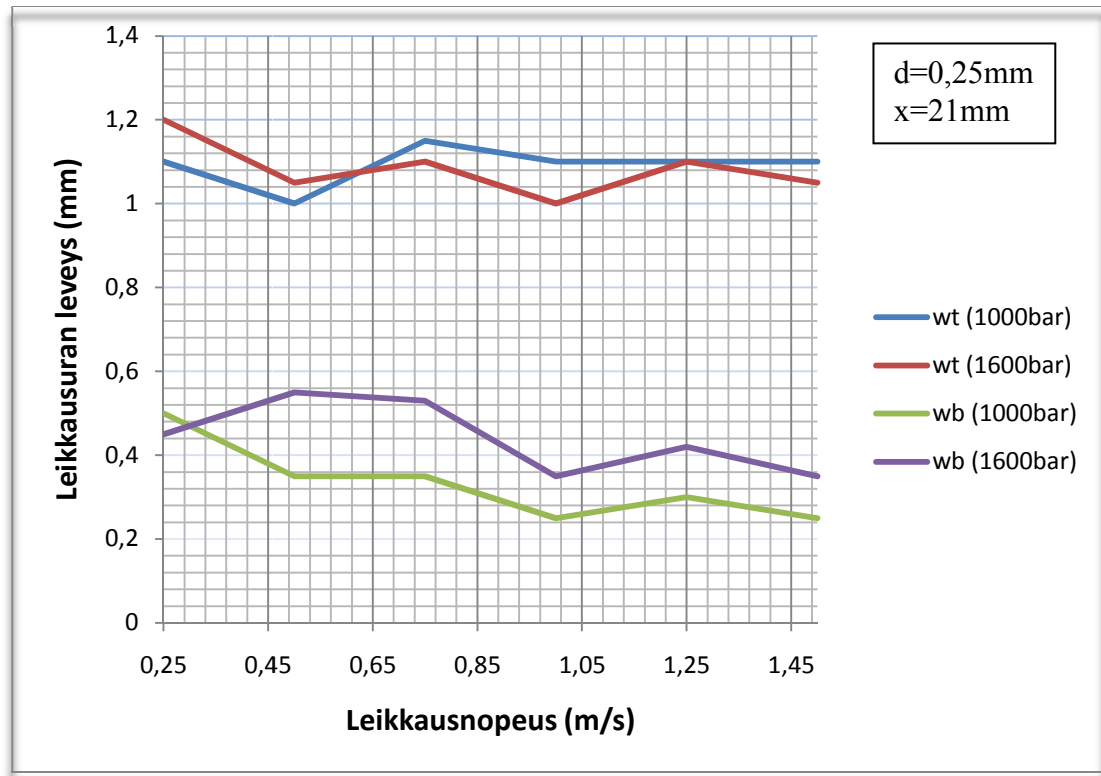
Kuva 6.4. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa paperia 80 g/m^2 1000 ja 1600 barin painetasoilla



Kuva 6.5. Leikkausurien leveydet leikattaessa 80 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

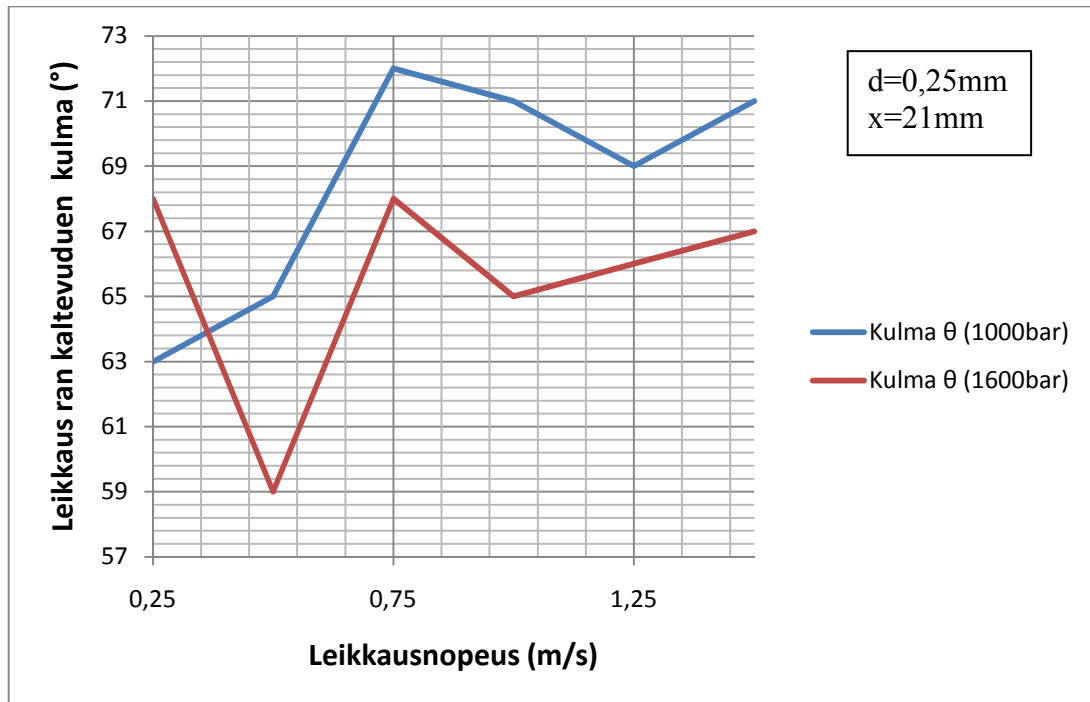


Kuva 6.6. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa paperia 80 g/m^2 1000 ja 1600 barin painetasoilla



Kuva 6.7. Leikkausurien leveydet leikattaessa 80 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Leikkaavan vesisuihkun halkaisija kasvaa hiljalleen sen edetessä kulkusuuntaansa akselinsa suuntaisesti kohti leikattavaa materiaalia. Tästä vesisuihkun hajoamisesta johtuva leveämpi leikkausura tulee esille kuvista 6.3 ja 6.7, joissa leikkausetäisyyttä on kasvatettu verrattaessa tilanteisiin, jotka ovat esitetty kuvissa 6.1 ja 6.5. Leikkausuran leikkausprofiili on V-mallinen jokaisessa tilanteessa, jossa on leikattu neliömassaltaan 80 g/m^2 olevaa paperia. V-mallinen leikkausura tarkoittaa leikkausuraa, jonka ylemmän osan leveys on suurempi verrattaessa sitä leikkausuran alemman osan leveyteen. Aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.1. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin) esitettiin, että leikkauspainetta kasvatettaessa ja leikkausnopeutta pienennettäessä saataisiin eroosion aikaan saamana A-mallinen leikkausprofiili. Tämä ei kuitenkaan näytä pitävän paikkaansa leikattaessa neliömassaltaan 80 g/m^2 paperia. Kuvissa 6.1, 6.3, 6.5 ja 6.7 esitettyjen leikkaustilanteiden leikkausparametrien arvoilla saadaan aikaan pienilläkin leikkausnopeuksilla juuri päinvastainen eli V-mallinen leikkausprofiili.



Kuva 6.8. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa paperia 80g/m^2 1000 ja 1600 barin painetasoilla

Leikkauspaineen kasvattaminen aiheuttaa leveän V-mallisen leikkausprofiilin vain pienemmillä leikkausnopeuksilla. Leikkauskokeissa, joissa käytetään suurempaa leikkausnopeutta, aiheutetaan vesisuihkulla muodostuvaa eroosiota vain hetkellisesti kohteena olevaan materiaaliin. Tässä tilanteessa kulutetaan materiaalin ylempää osaa vähemmän ja leikkausuran profiilin malli muuttuu tasareunaisemmaksi. Kuvista 6.1 ja 6.5 voidaan nähdä kuinka leikkausuran ylempi osa alkaa kaventua leikkausnopeutta kasvatettaessa. Leikattaessa paperia on oletettavaa, että päinvastaisuus aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.1. Leikkausnopeus ja leikkauspään suutin) esitettyyn teoriaan syntyvästä leikkausprofiilin muodosta, johtuu paperin ohuudesta. Paperin ollessa ohutta leikkausmateriaalia ei siihen ehdi muodostua A-mallin mukaista leikkausprofiilia. Vesisuihkun leikkaantuessa paperin läpi erittäin nopeasti ei sen hajoamisen aikaansaamaa alapäästään leveämpää leikkausprofiilia ehdi muodostua. Toinen asia mikä vaikuttaa V-mallisen leikkausprofiilin muodostumiseen on leikkaustilanteessa ilmenevä paperin taipuminen. Vesisuihkun lävistäessä leikattava ohut paperi, taipuvat paperin molemmat leikkaustilanteessa syntyvät leikkausuran sivut alaspäin. Tästä taipumisesta johtuen leikkausuran alempien osien välinen alue ei ehdi kulumaan yhtä leveäksi verrattaessa tätä alemman osan leveyttä leikkausuran ylemmän osan leveyteen.

Vesisuihkun hajotessa muodostuva kartiomainen malli saa paksumpaan ja kovempaan materiaaliin aikaan alapäästään leveämmän leikkausprofiilin mallin. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa leikattaessa ohutta ja pehmeää materiaalia kuten paperia. Suuremmilla leikkausnopeuksilla on siis suuremman paineen käyttö käyttökelpoista

ohuempien ja pehmeämpien materiaalien tapauksissa haluttaessa muodostaa tasareunaisempaa leikkausuraa.

Leikattaessa neliömassaltaan 80g/m^2 olevaa paperia voidaankin olettaa, että alle 0,25 metrin sekuntinopeutta käytettäessä yhdessä 1000 barin leikkauspaineen kanssa, saataisiin aikaan A-mallinen leikkausura. Toisaalta myös pitää paikkansa, että leikkauksnopeutta tarpeeksi kasvatettaessa, riippumatta käytetystä leikkauspaineesta, leikkausreunat muodostuvat pystysuoremmiksi. Reunojen ollessa pystysuorempia ollaan myös lähempänä A-mallista leikkausuran mallia.

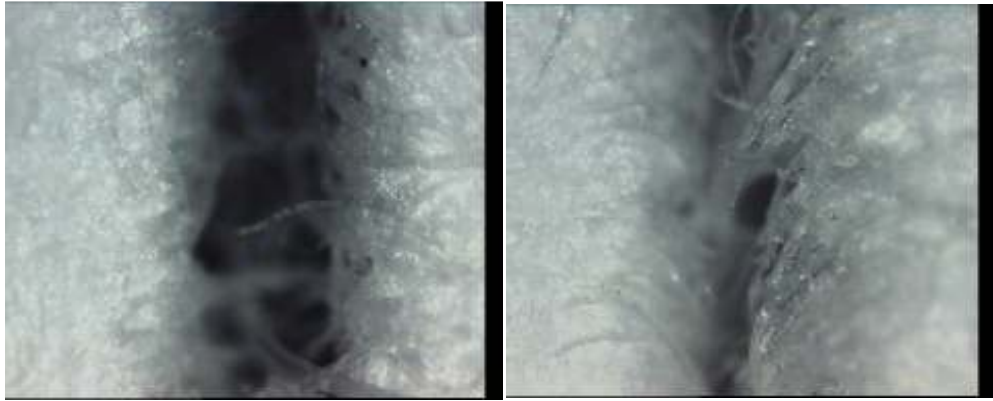
Leikkausuran kaltevuuden kulmat pysyvät eri leikkauksnopeuksilla loivempina tilanteissa, joissa leikkauspään suutin on vaihdettu suuremmaksi. Verrattaessa kuvia 6.2 ja 6.6 kuviin 6.4 ja 6.8 huomataan, että pelkästään suuttimen vaihtuessa suurempaan kokoon kasvaa leikkausuran kaltevuuden kulmat lähes kymmenen astetta. Suuttimen kasvattamisen ansiosta sen läpi kulkeva tilavuusvirta kasvaa, mikä tarkoittaa vesisuihkun tehon kohoamista. Mitä tehokkaampi vesisuihku on, sitä laajemmalla alueella se vaikuttaa leikattavaan kappaleeseen vesisuihkun vastaisella puolella. Kyseisessä kuvaparissa on myös huomioitavaa, että suuremmalla suuttimella leikkausuran kaltevuuden kulmat kasvavat leikkauksnopeutta lisättäessä. Käytettäessä pienempää suutinta leikkausuran kaltevuuden kulmat pienenevät leikkauksnopeuden kasvaessa. Kaltevuuden kulmien pieneminen johtuu pienemmän suuttimen nopealla leikkauksnopeudella aikaan saamasta kapeasta leikkausuran ylemmästä osasta. Käytettäessä suurempaa suutinta saadaan aikaan tehokkaammalla vesisuihkulla eri leikkauksnopeuksilla aina V-mallin leikkausuran profiili.

Kuvista 6.3 ja 6.7 nähdään, minkälainen leikkausura on leikkausetäisyyttä kasvatettaessa. Leikkausuran ylemmän osan halkaisija on yli 0,2 millimetriä leveämpi verrattaessa sitä pienemmällä leikkausetäisyydellä saatuihin leikkauksiin. Pienemmällä leikkausetäisyydellä saadut tulokset ovat kuvissa 6.1 ja 6.5. Leikkausetäisyyttä vaihtelemalla leikkausuran alemman osan leveys ei kuitenkaan juuri muutu. Suurin aikaansaatu ero tulee esille kuvasta 6.7, jossa on tulokset käytettäessä korkeampaa 1600 barin leikkauspainetta. Kuvasta 6.7 käy ilmi, että suuremmalla leikkauspaineella, -nopeudella ja -etäisyydellä saadaan aikaan suhteellisen leveä leikkausuran alempi osa. Muuten vastaavilla arvoilla, mutta pienemmällä leikkausetäisyydellä saadaan aikaan samassa tilanteessa trendiltään pienenevä leikkausuran alemman osan leveys. Tämä trendiltään kaventuva leikkausura nähdään kuvasta 6.5. Korkeammalla leikkauspaineella aikaansaatu tehokkaampi vesisuihku leikkaa kauempanakin olevaa materiaalia tehokkaasti suuremmalla leikkauksnopeudella.

Leikkausuran kaltevuuden kulmat ovat suurempia leikattaessa materiaalia kauempaa. Leikkauksurien kaltevuuden kulmien kasvaminen tulee esille kuvista 6.4 ja 6.8. Suuremmat leikkausuran kaltevuuden kulmat selittyvät leikkausuran leveämmillä ylemmillä osilla, johtuen vesisuihkun hajoamisesta leikkausetäisyyttä kasvatettaessa.

Kuvassa 6.9 nähdään kuinka leikkausetäisyyden kasvattaminen on vaikuttanut leikkauksuraan. Kuvan tilanteessa leikkauspaineena on 1600 baria, leikkauksnopeutena 1,0 metriä sekunnissa ja leikkausetäisyyksinä 10 ja 21 millimetriä.

Vasemmanpuoleisessa kuvassa nähdään pienemmällä leikkausetäisyydellä aikaansaatu leikkausura ja oikean puoleisessa kuvassa on suuremmalla leikkausetäisyydellä aikaansaatu leikkausura. Suuremmalla leikkausetäisyydellä vesisuihkulla on hajotettu paperin pintaa laajemmalta alueelta ja tällä tavalla kasvatettu leikkausuran ylemmän osan leveyttä.

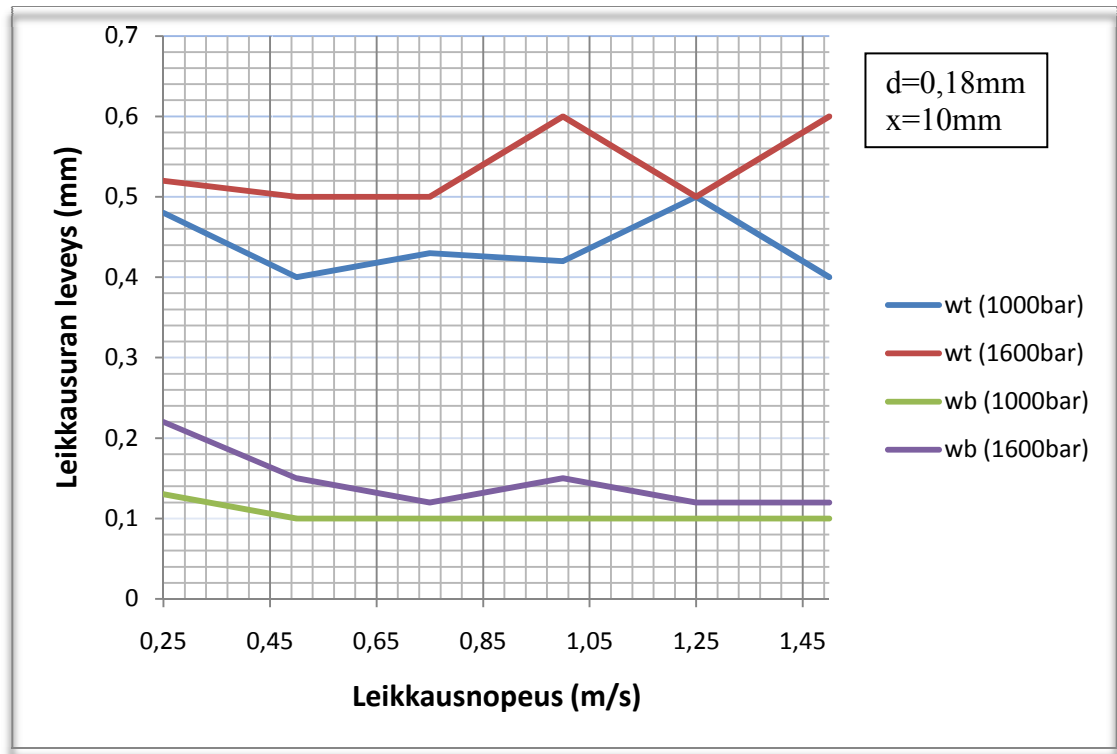


kuva 6.9. Leikkausetäisyyden kasvattaminen heikentää leikkausjäljen laatua.

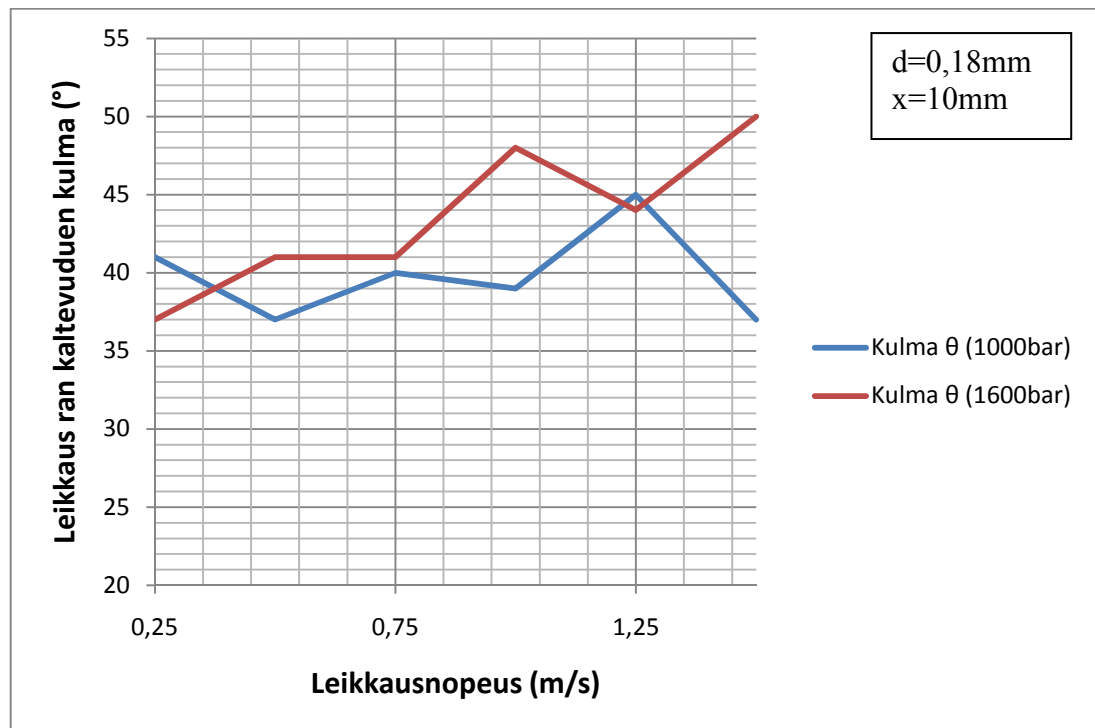
6.2. Paperin 112g/m² leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi

Tämän kappaleen kuvissa 6.10-6.17 on esitelty leikkauskokeissa saatuja mittaustuloksia. Kuvaajat esittelevät neliömassaltaan 112g/m² paperin leikkaamisesta saatuja tuloksia. Kuvissa esitellään leikkausurien piirteitä, jotka saadaan aikaan muuttamalla leikkausnopeutta, -painetta, -etäisyyttä ja suuttimen halkaisijan kokoa. Kuvat esittelevät kokonaisuudessaan tulokset, jotka muodostetaan eri leikkausparametrien kombinaatioilla.

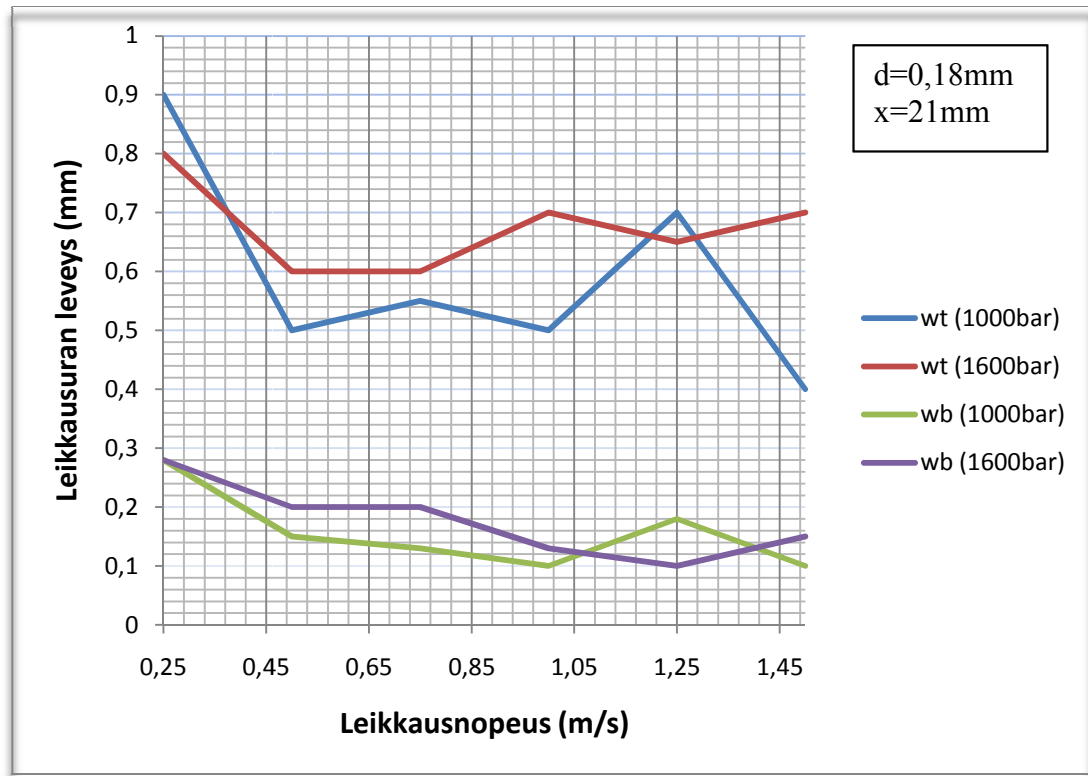
Kuvista 6.10, 6.12, 6.14 ja 6.16 nähdään, että leikattaessa hieman vahvempaa paperia kuin edellisen kappaleen (luku 6.1. Paperin 80 g/m² leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysoiminen) leikkauskokeissa, leikkauspaineen nostamisen vaikutus leikkausuran leveyteen vähenee. Kuvista on kuitenkin nähtävissä, että leikkauspainetta nostettaessa saadaan aikaan hieman leveämpi leikkausura. Kuten edellisen kappaleen leikkaustilanteissa leikkausura on V-mallinen, jonka ylemmän osan leveyden suhde alemman osan leveyteen pysyy suhteessa samana eri leikkausnopeuksilla. Tämä tarkoittaa sitä, että leikkausnopeutta muunnettaessa muuttuvat leikkausurien ylemmän ja alemman osan leveydet samaan aikaan, joko pienemmiksi tai suuremmiksi.



Kuva 6.10. Leikkausurien leveydet leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

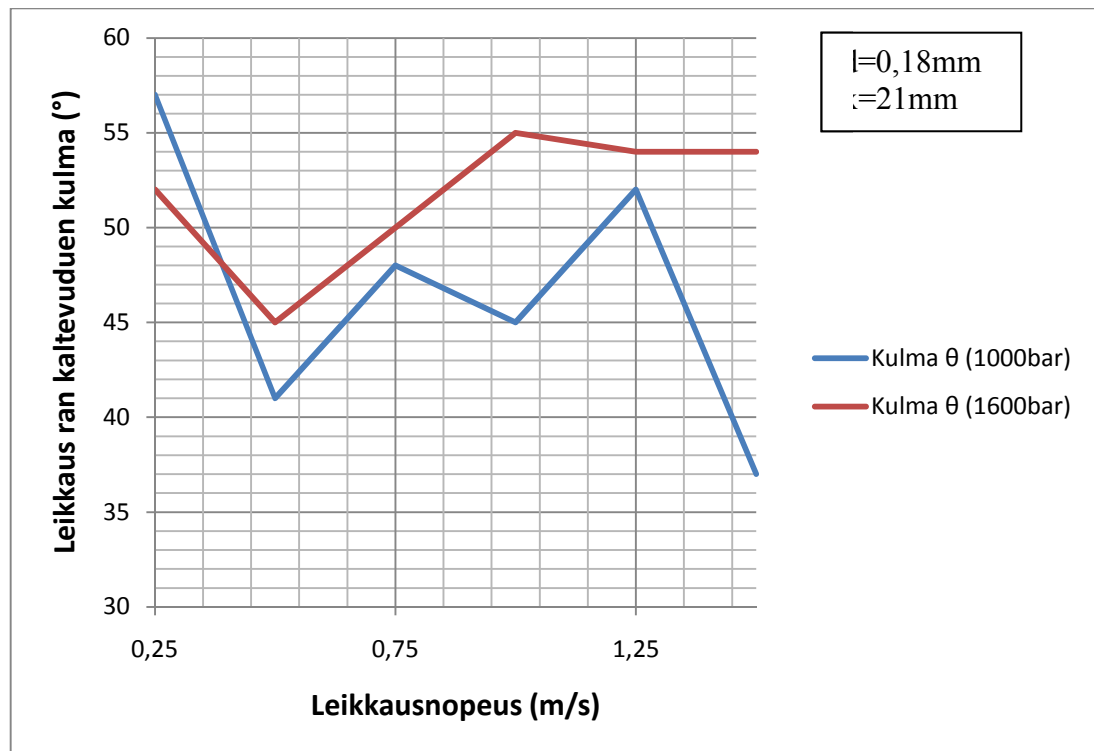


Kuva 6.11. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

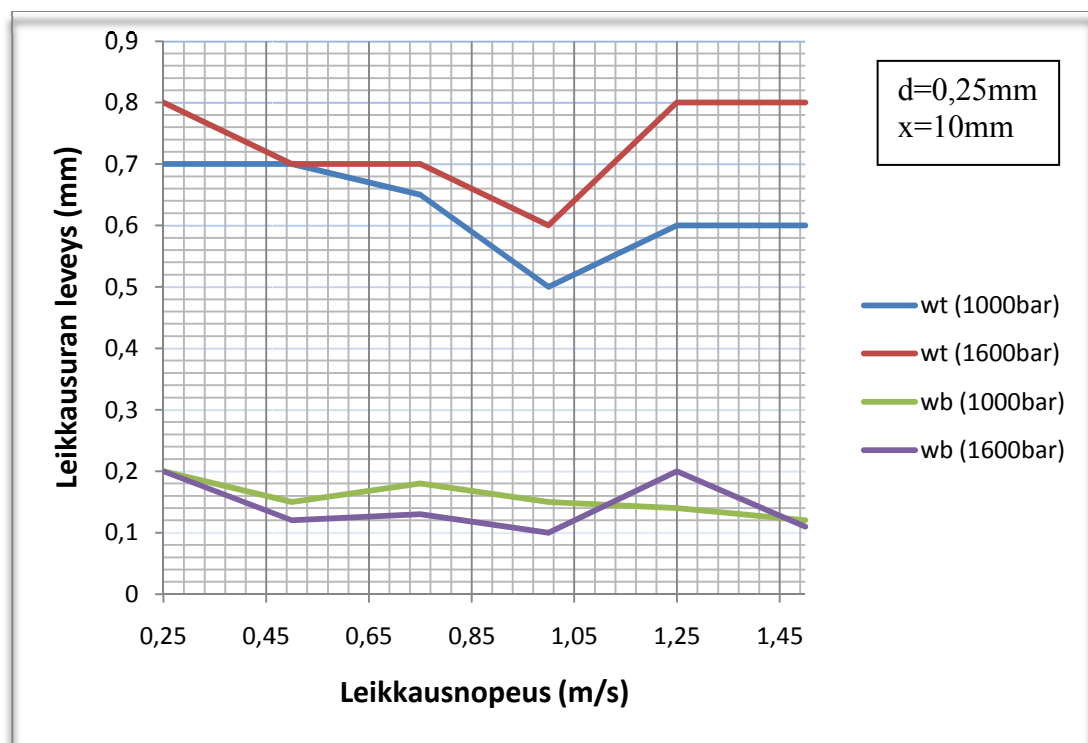


Kuva 6.12. Leikkausurien leveydet leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

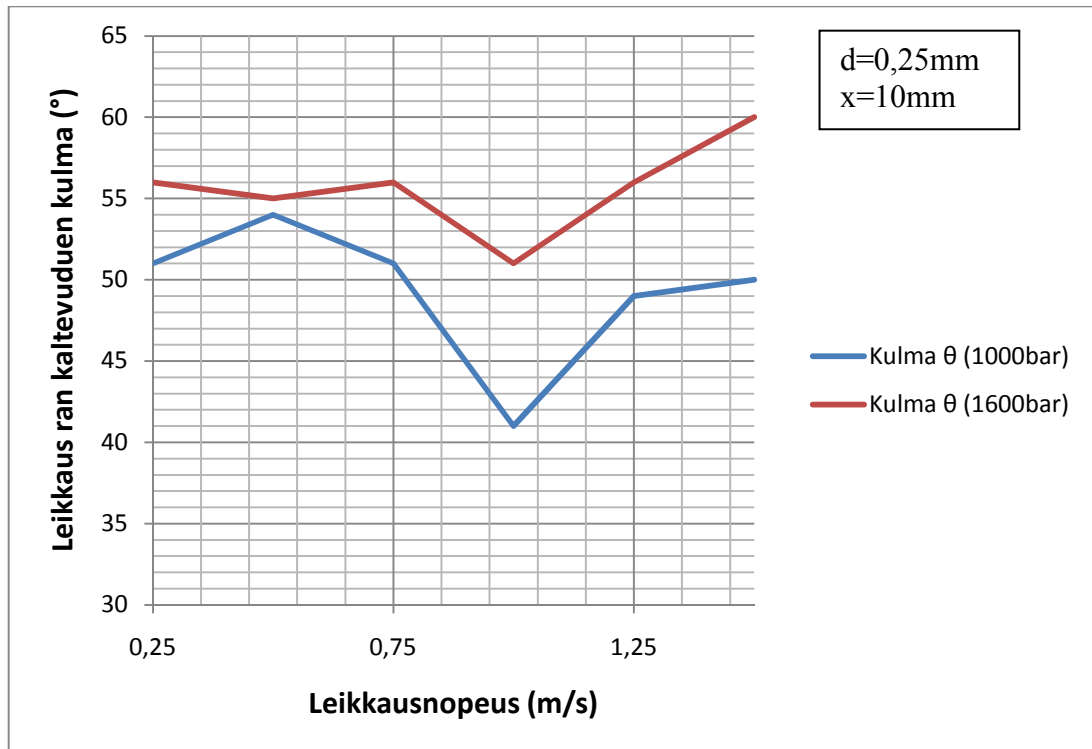
Leikkausetäisyyden kasvattamisella on samantyyppinen vaikutus leikkausuraan kuin aikaisemmankin kappaleen (luku 6.1. Paperin 80 g/m^2 leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysoiminen) vastaavassa tilanteessa. Tilanteiden erona on leikattavien materiaalien neliömassan suuruus. Kuvaparista 6.10, 6.12 ja 6.14, 6.16 nähdään, että leikkausetäisyyden kasvattaminen, pienellä leikkausnopeudella, saa aikaan noin 0,3-0,4 millimetrin kasvun leikkausuran ylemmässä osassa. Leveyden kasvu huomataan verrattaessa muutoksia pienemmällä leikkausetäisyydellä saatuihin tuloksiin. Kuvasta 6.12 nähdään, että kun paperia leikataan suuremmalla leikkausetäisyydellä, jonka neliömassa on 112 g/m^2 , saadaan aikaan laadukasta leikkausjälkeä. Nyt tuloksien aikaansaamiseksi on käytetty pienempää leikkauspainetta ja suurempaa leikkausnopeutta. Tässä tilanteessa vesisuihkulla leikattaessa ei vaikuteta kuin hetkellisesti materiaalin pintaan. Suuremmalla leikkauspaineella leikkauspinnan laatu heikkenee, johtuen aikaansaadusta voimakkaammasta tilavuusvirrasta. Käytettäessä tässä tilanteessa riittävää, eli pienempää leikkauspainetta, saadaan aikaan parempi laatuinen ja kapeampi leikkausjälki.



Kuva 6.13. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

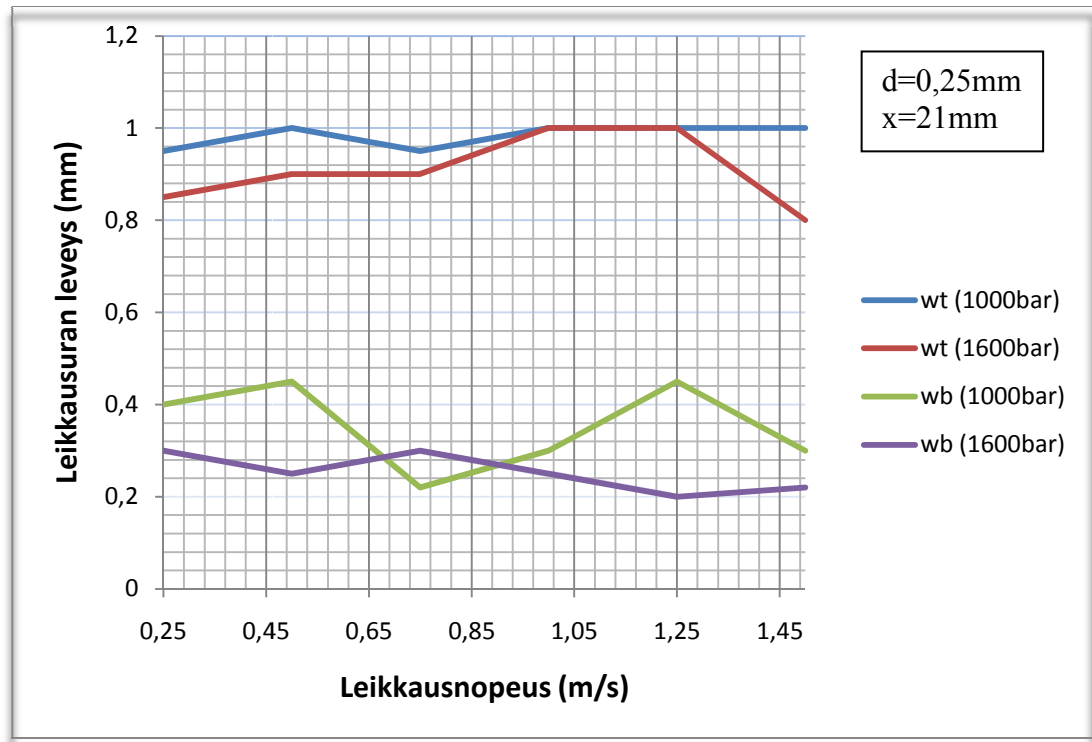


Kuva 6.14. Leikkausurien leveydet leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



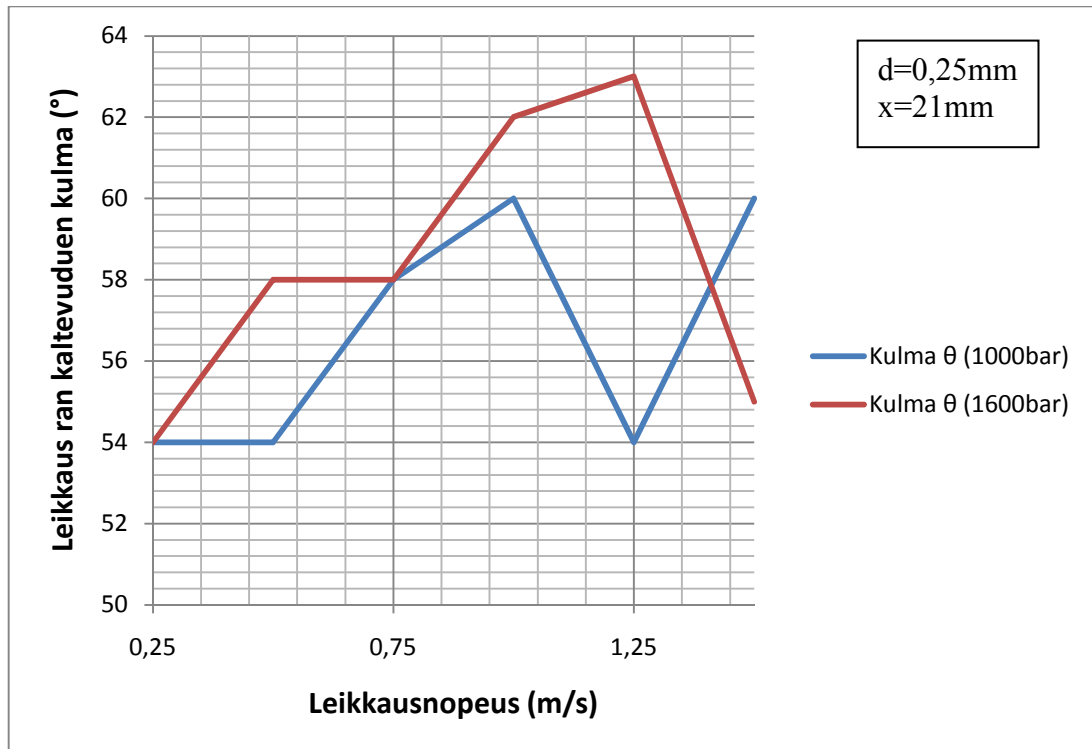
Kuva 6.15. Leikkausurien kaltevuuden kulmat leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Kun vesisuihkulla leikataan hieman vahvempaa paperia, huomataan, että leikkausuran kaltevuuden kulmat ovat matalammilla leikkausnopeuksilla leikkauspaineesta riippumatta hieman pienempiä. Leikkausnopeutta kasvatettaessa leikkausuran kaltevuuden kulmat kasvavat hieman suuremmiksi, mikä saattaa johtua paperin suuremmasta paksuudesta. Leikkausuran kaltevuuden kulmien kasvaminen leikkausnopeutta kasvatettaessa voidaan todeta kuvista 6.11 ja 6.15. Paperin ollessa paksumpaa vesisuihku kuluttaa leikattavaa paperia enemmän, ennen kuin se taipuu vesisuihkun mukana. Mitä kauemmin paperi pitää alkuperäisen muotonsa, sitä enemmän leikkausuran ylempi osa kuluu. Leikkausuran kaltevuuden kulma muodostuu suuremmaksi, kun leikkausuran ylempi osa on huomattavasti suurempi kuin leikkausuran alempi osa.



Kuva 6.16. Leikkausurien leveydet leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Käytettäessä suurempaa leikkausetäisyyttä ei suuttimen vaihtamisella ole juuri minkäänlaista vaikutusta leikkausuran leveyteen. Kuvista 6.14 ja 6.16 voidaan nähdä, etteivät leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet juurikaan muutu vaihdettaessa leikkauspään suutin suuremmaksi eli kasvattamalla sen halkaisija 0,25 millimetrin koko luokkaan.



Kuva 6.17. Leikkausurien leveydet leikattaessa 112 g/m^2 paperia leikkaspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Kuvaparia 6.10, 6.14 ja 6.12, 6.16 toisiinsa vertaamalla nähdään miten leikkauspäässä käytetyn suuttimen vaihtaminen suuremmaksi muuttaa leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveyksiä. Leikkausuran ylemmän osan leveys muuttuu enemmän sitä verrattaessa leikkausuran alempaan osaan. Syynä miksi leikattavaan materiaaliin muodostuu V-mallinen leikkausura, voidaan pitää sen pehmeystä johtuvaa taipuvuutta. Vesisuihku vaikuttaa voimakkaimmin leikattavan materiaaliin pinnassa. Materiaali on vielä yhtenä kappaleena pysyttäessä leikkausprosessin kehittyneellä leikkausvaihe alueella. Tämän vaiheen aikana leikkausuran ylempi osa laajenee. Heti kun vesisuihku läpäisee materiaalin sen reunat antavat periksi ja ne pääsevät taipumaan hieman alaspäin. Tässä tilanteessa leikkaavalla vesisuihkulla ei enää ehditä kuluttamaan leikkausuran alempaa osaa yhtä leveäksi kuin sen ylemmän osan leveys on.

Käytettäessä suurempaa leikkausetäisyyttä ja suutinta, jolla vesisuihku muodostetaan, leikkausuran kaltevuuden kulmat ovat eri leikkausnopeuksilla lähes koko ajan yli 45 astetta. Nämä suuret leikkausuran kaltevuuden kulmat nähdään kuvassa 6.17. Kulmien suuruudesta voidaan päätellä, että vesisuihku on hajonnut kulkiessaan leikkausetäisyyden osoittaman välimatkan, ennen osumistaan materiaaliin. Tämä hajonnut vesisuihku saa aikaan suuremman leikkausuran ylemmän osan verrattaessa sitä leikkausuran alemman osan leveyteen. Leikkausurien ylemmän ja alemmanosan ollessa toisiinsa nähden erikoiset ovat myös leikkausurien kaltevuuksien kulmien koot nollaa

suurempia. Tämä leikkausuran kaltevuuden kulman positiivinen arvo tarkoittaa, että kyseessä on V-mallinen leikkausura.

Leikattaessa neliömassaltaan 112 g/m^2 olevaa paperia on havaittavissa kuitenkin pientä epäsäännöllisyyttä leikkausurien leveyksissä, varsinkin käytettäessä suurempaa leikkausnopeutta. Tämän kaltaisen epäsäännöllisyyden voi aiheuttaa esimerkiksi paperin kuitumainen rakenne, joka saattaa repeytyä epäsäännöllisesti sitä leikattaessa. Tästä epäsäännöllisyydestä on esimerkki kuvassa 6.18, jonka yläosassa nähdään hieman leveämpi leikkausura kuin sen alaosassa. Kuvassa 6.18 voidaan erottaa leikkausuran ylemmän osan leveyden muodostuvan materiaaalissa näkyvien valoisampien alueiden välille. Leikkausuran alemman osan leveys on sama kuin kuvan keskellä näkyvän mustan railon leveys.



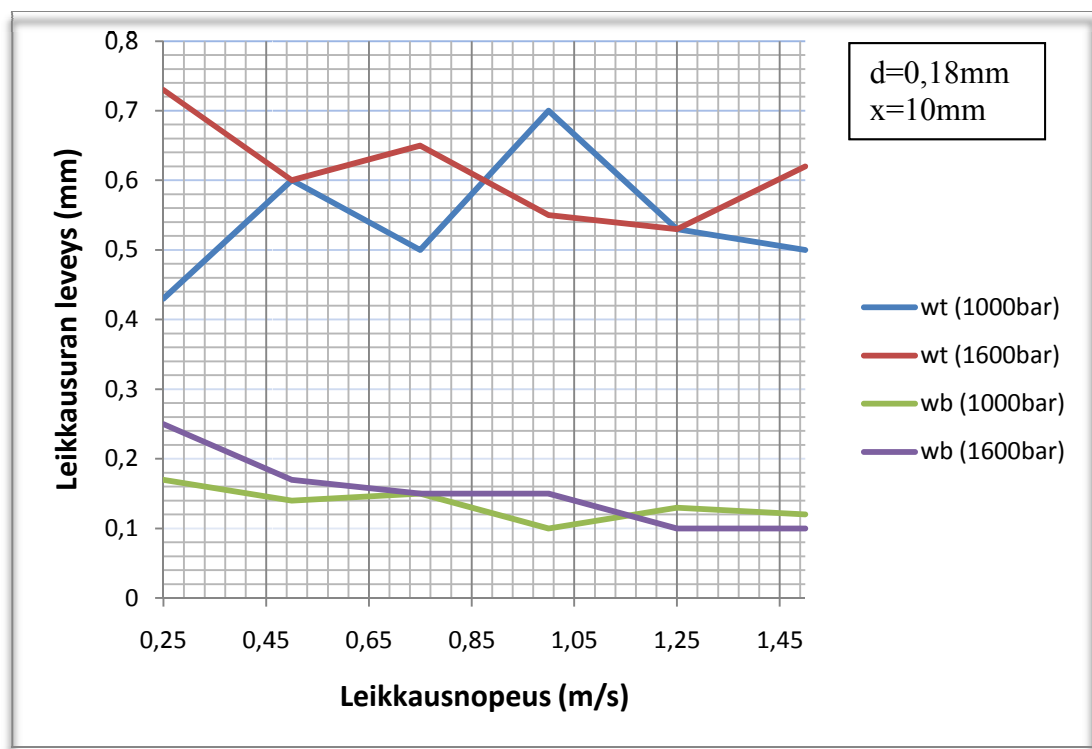
Kuva 6.18. Epäsäännöllisyyttä leikkausuran leveydessä (paperi 112 g/m^2)

Leikkausuran laatuun vaikuttaa vesisuihkun muodostavan leikkauspaineen suuruuden vaihtelut. Paineenmuuntimen avulla ei saada aikaan täysin tasaista leikkauspainetasoa vaan leikkauspaine voi hetkellisesti vaihdella muutamia kymmeniä tai jopa satoja bareja. Kummallakaan leikkauskokeissa käytetyistä leikkauspaineista ei ole ongelmia läpäistä 112 g/m^2 neliömassan paperia käytetyllä leikkausnopeusalueella.

6.3. Paperin 224 g/m^2 leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi

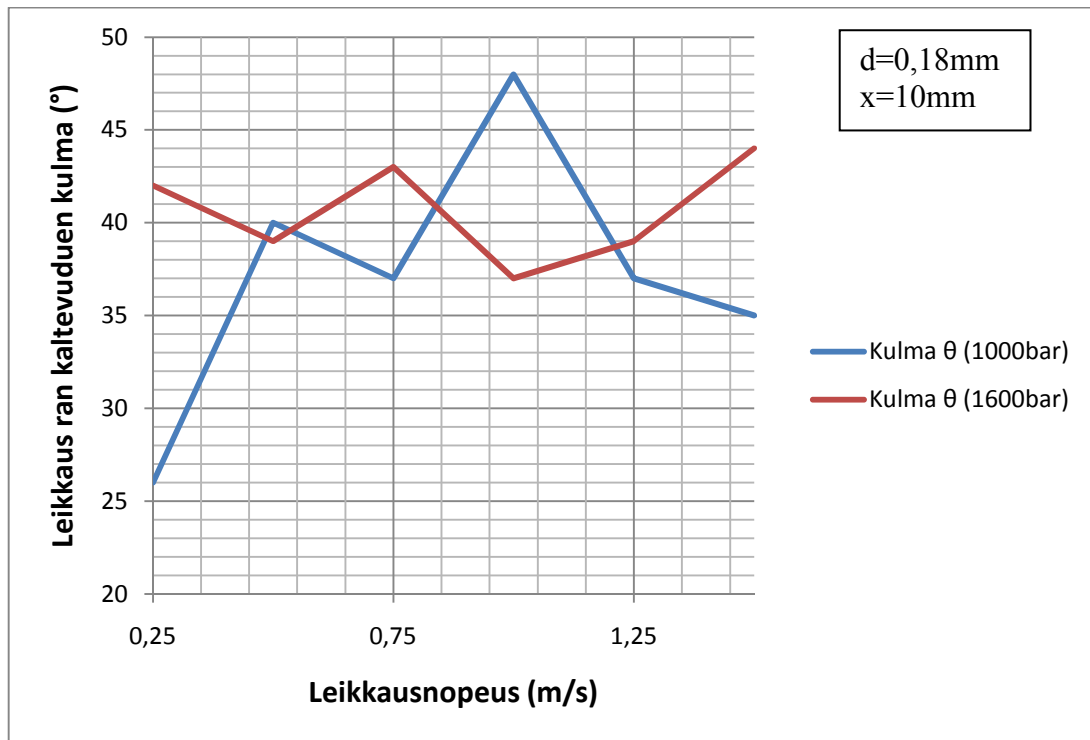
Tämän kappaleen kuvissa 6.19- 6.26 on esitelty leikkauskokeissa saatuja mittaustuloksia. Kuvaajat esittelevät neliömassaltaan 224 g/m^2 paperin leikkaamisesta saatuja tuloksia. Kuvissa esitellään leikkausurien piirteitä, jotka saadaan aikaan muuttamalla leikkausnopeutta, -painetta, -etäisyyttä ja suuttimen kokoa. Kuvat esittelevät kokonaisuudessaan tulokset, jotka muodostetaan eri leikkausparametrien kombinaatioilla.

Neliömassan 224g/m^2 paperia vesisuihkulla leikattaessa leikkauspaineen muutoksella on suurempi vaikutus uran ylemmässä osassa kuin sen alemmassa osassa. Tämä tulee esille tuloksia verrattaessa aikaisempien kappaleiden (luvut 6.1. ja 6.2.) leikkaustuloksiin. Kuvia 6.19, 6.21, 6.23 ja 6.25 katsottaessa huomataan, että leikkauspainetta kasvatettaessa saadaan aikaan V-mallinen leikkausura, jonka ylempi osa on leveämpi verrattaessa sitä sen alemman osan leveyteen. Mitä paksumpaa materiaali on, sitä kauemmin viivytään kehittyneen leikkausvaiheen alueella. Mitä kauemmin tämä leikkausprosessin keskimäinen vaihe kestää sitä leveämmäksi leikkausuran ylempi osa muodostuu. Suuremmalla leikkauspaineella aikaansaadulla vesisuihkulla kulutetaan myös leikattavaa materiaalia suuremmalta alueelta, kuin pienemmällä leikkauspaineella aikaansaadulla vesisuihkulla.



Kuva 6.19. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

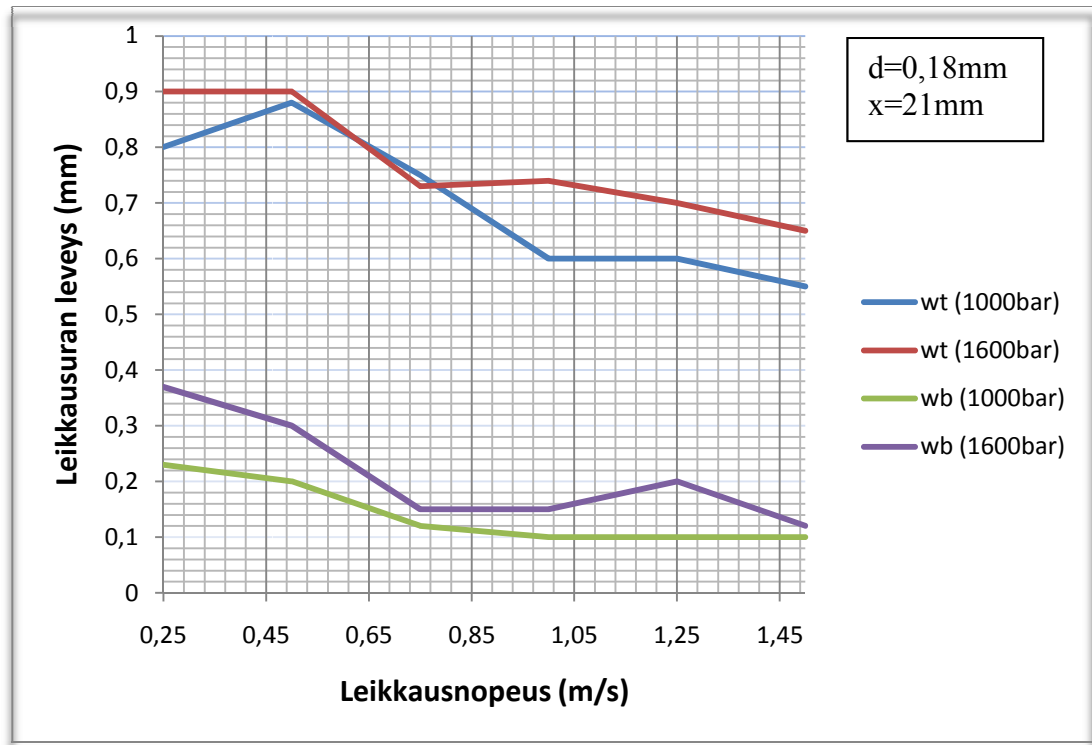
Leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet eivät muutu tasaisesti niitä verrattaessa toisiinsa, leikkausnopeutta kasvatettaessa. Kuvassa 6.19 olevasta kuvaajasta nähdään, että leikkausnopeuden ollessa noin yksi metri sekunnissa, on leikkausuran ylemmän osan leveys huomattavasti suurempi. Ero on näkyvä kun sitä verrataan muissa leikkauskokeissa, eri leikkausnopeuksia käytettäessä, saatuihin tuloksiin. Tämän kaltainen heitto johtuu materiaalista tai laitteistossa olevasta häiriö tekijästä. Tämän työn aikana tehdyissä leikkauskokeissa todennäköisimmät häiriötekijät ovat leikkauspaineen vaihtelevuus ja leikkaustason tai -materiaalin heilahtaminen leikkauksen aikana.



Kuva 6.20. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

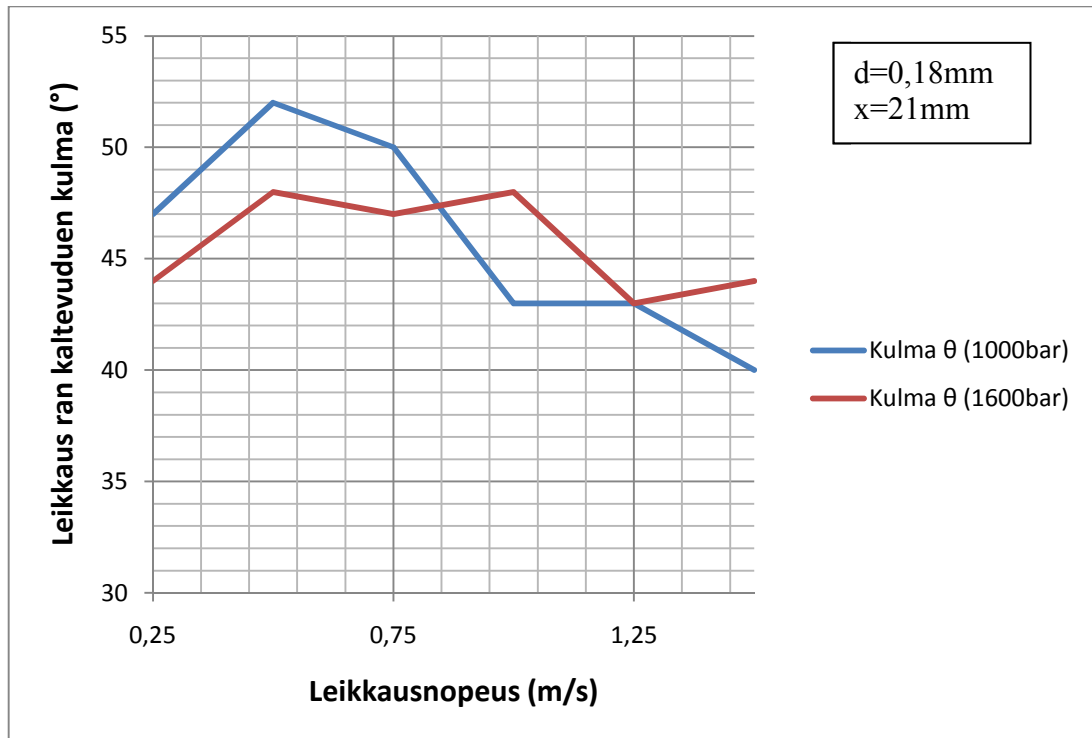
Kuvasta 6.20 nähdään, että pienin leikkausuran kaltevuuden kulma saadaan aikaan pienellä leikkausnopeudella ja leikkauspaineella. Muissa tilanteissa, joissa on leikattu paperia, jonka neliömassa on 224 g/m^2 , saadaan aikaan leikkausuran kaltevuuden kulma, joka on suuruudeltaan noin 45 astetta.

Tässä työssä leikkausurien kaltevuuden kulmien arvot, papereita leikattaessa, ovat suuruudeltaan 45 asteen tuntumassa. Leikkausmateriaaleiksi valittujen papereiden paksuudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Vesisuihkulla leikattavan materiaalin paksuus vaikuttaa aikaan, missä vesisuihkulla ehditään materiaali katkaisemaan. Kun leikkauksiin kuluvat ajat ovat materiaalin välillä hyvin lähellä toisiaan, ovat myös syntyvien leikkausurien muodot samankaltaisia

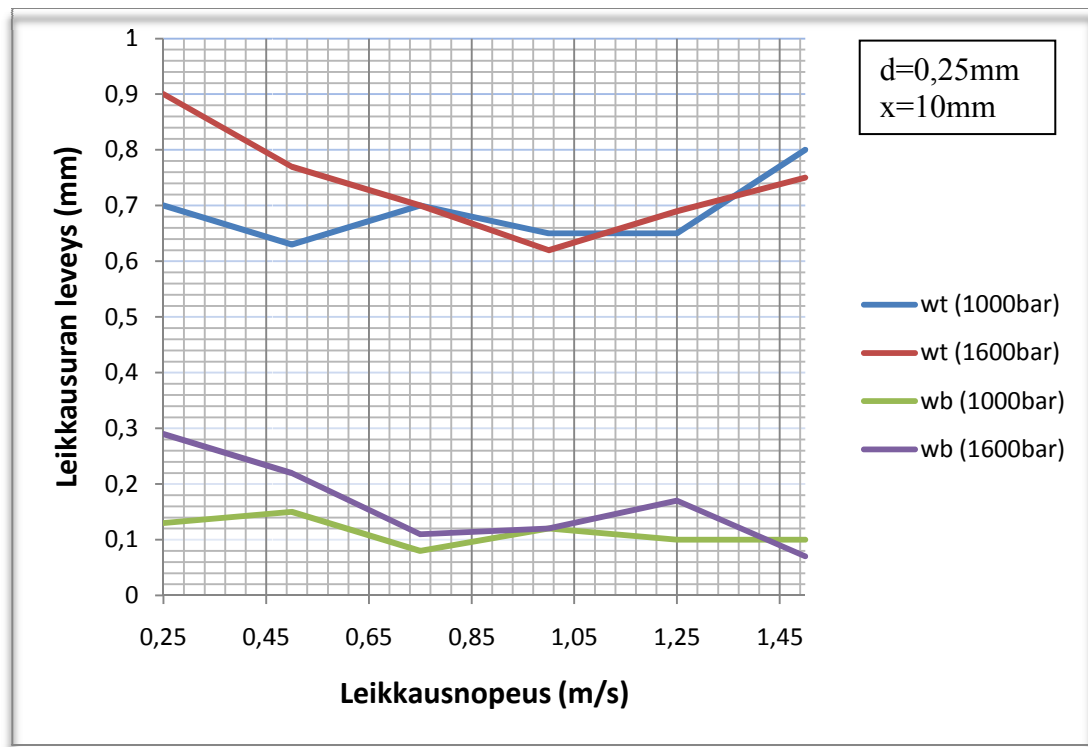


Kuva 6.21. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

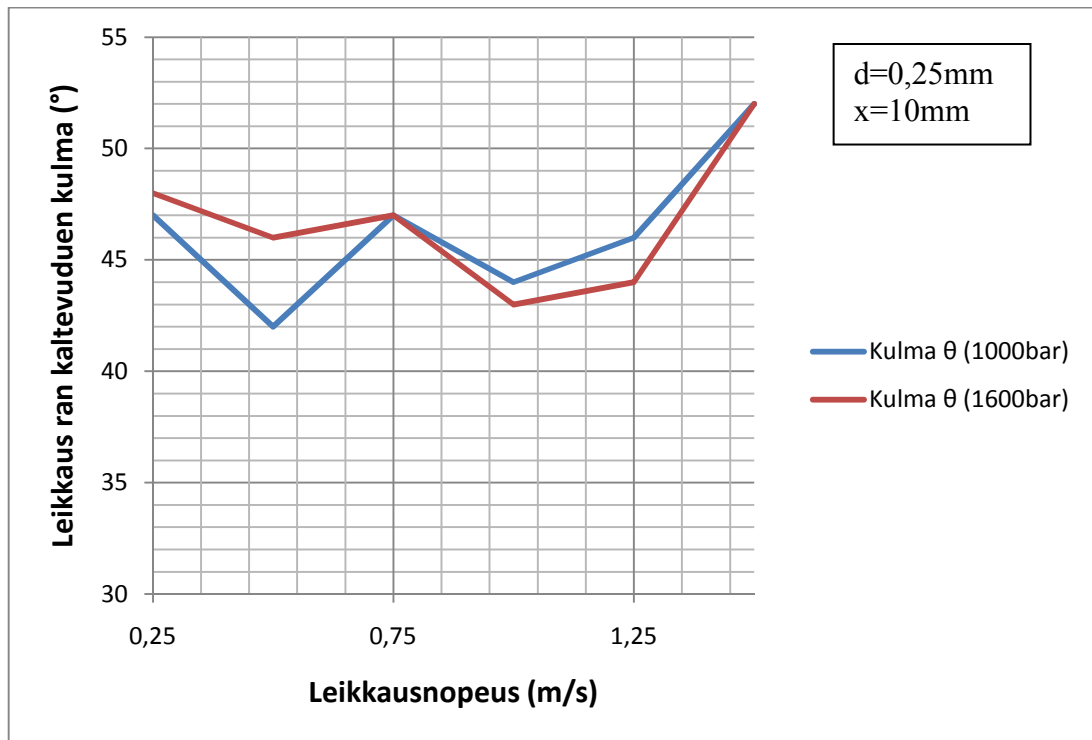
Kuvasta 6.21 nähdään tulokset leikkauskokeista, joissa leikkausnopeutta kasvatettaessa leikkausuran ylemmän osan leveys pienenee käytettäessä suurempaa leikkausnopeutta ja pienempää leikkauspainetta. Kummassakin tilanteessa leikkausnopeuden ollessa suurimmillaan eli puolitoista metriä sekunnissa on ylemmän leikkausuran leveys pienentynyt noin 0,2 millimetriä. Leikkausuran alemman osan leveys ei kuitenkaan muutu millään leikkausuralla yli 0,1 millimetriä leikkausetäisyyttä pienennettäessä. Leikkausuran alemmien osien leveyksien suuruuksien muuttumattomuus tulee esille kuvista 6.19 ja 6.21. Suurimmat vaikutukset leikkausparametrien arvoja muunneltaessa saadaan aikaan leikkausurien ylempien osien leveyksiin. Hetkellä, jolloin paperi vesisuihkuleikattaessa katkeaa, ei sen alkuperäinen muoto enää säily. Leikattavan materiaalin antaessa periksi, ei siihen enää pystytä vaikuttamaan kuluttavasti vesisuihkulla.



Kuva 6.22. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m² paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

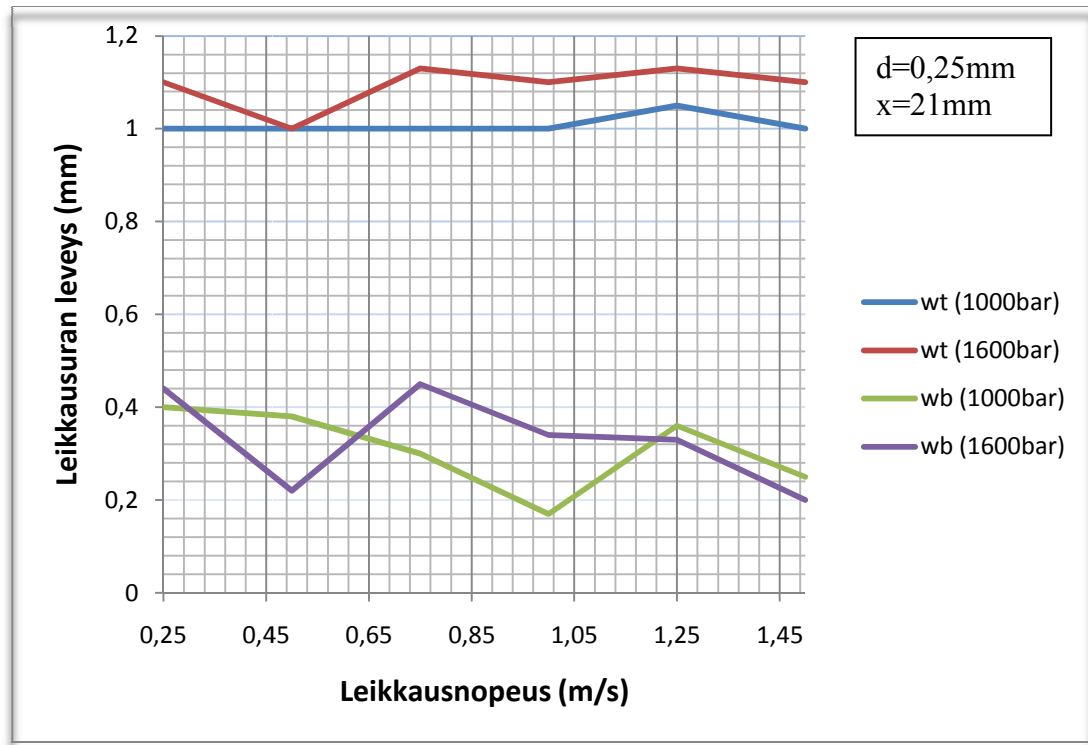


Kuva 6.23. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m² paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



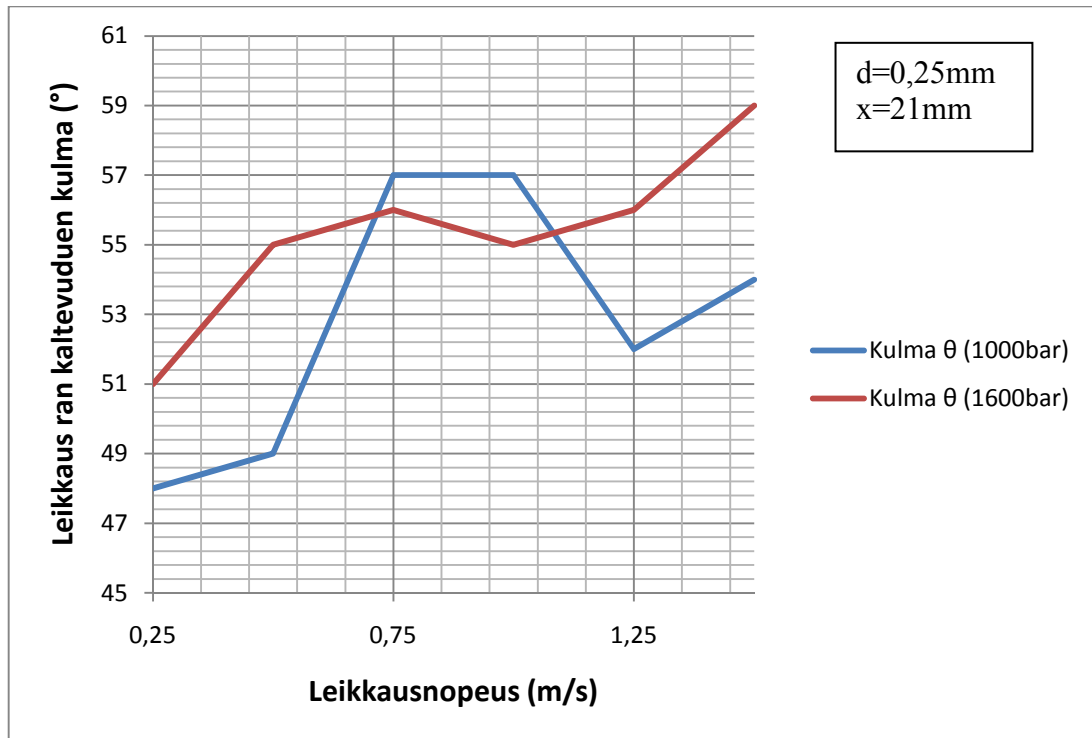
Kuva 6.24. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Kasvatettaessa leikkausetäisyyttä saadaan aikaan leikkausura, jonka ylemmän osan leveys on huomattavasti suurempi kuin sen alemman osan leveys. Kuvaparista 6.23 ja 6.25 nähdään, että leikkausuran ylempi osa levenee leikkausetäisyyttä kasvatettaessa pienemmillä leikkausnopeuksilla 0,1-0,2 millimetriä, eli noin kaksinkertaiseksi. Tämä leikkausparametrien arvojen muunnoksien vaikutus leikkausuraan on samankaltainen kuin aikaisemmissakin leikkaustilanteissa.



Kuva 6.25. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Käytettäessä suurempaa leikkausetäisyyttä ja koon 0,25 millimetrin suutinta, nähdään kuvasta 6.25, kuinka tasapaksu leikkausuran ylemmästä osasta muodostuu. Huolimatta siitä mitä leikkausnopeutta käytetään, eivät leikkausuran ylempien ja alempien osien leveydet juurikaan muutu. Lähes vastaava tilanne on kuvassa 6.21, jossa ainoana erona on kooltaan pienempi suutin. Pienempää suutinta käytettäessä huomataan kuinka suuremmalla leikkausnopeudella leikkausuran ylempi osa hieman kapenee. Suuttimen koko määrää suoraan tilavuusvirran suuruuden kautta tehon suuruuden ja vesisuihkun leikkaavan pinta-alan. Suuremman suuttimen tehokkuus näkyy sillä aikaan saatujen leikkausurien suurempina leveyksinä. Pienemmällä suuttimella saadaan aikaan pienempi teho sekä pienempi leikkauspinta-ala. Tässä tapauksessa käytettäessä suurempaa leikkausnopeudetta muodostuu leikkausurasta kapeampi. Nämä suuttimen muutoksen aikaansaamat tulokset ovat esillä kuvissa 6.19 ja 6.21. Tilanne eroaa aikaisemman kappaleen (luku 6.2. Paperin 112 g/m^2 leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysoiminen) tilanteesta, jossa todettiin suuremman leikkausnopeuden aikaansaama suoraseinäisempi leikkausura. Tässä tilanteessa materiaalin paksuus on suurempi eikä tämän takia suuremman suuttimenkaan aikaansaama tehokkaampi vesisuihku ehdi kuluttamaan leikkausuraa aikaisempaa tilannetta tasareunaisemmaksi.



Kuva 6.26. Leikkausurien leveydet leikattaessa 224 g/m^2 paperia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

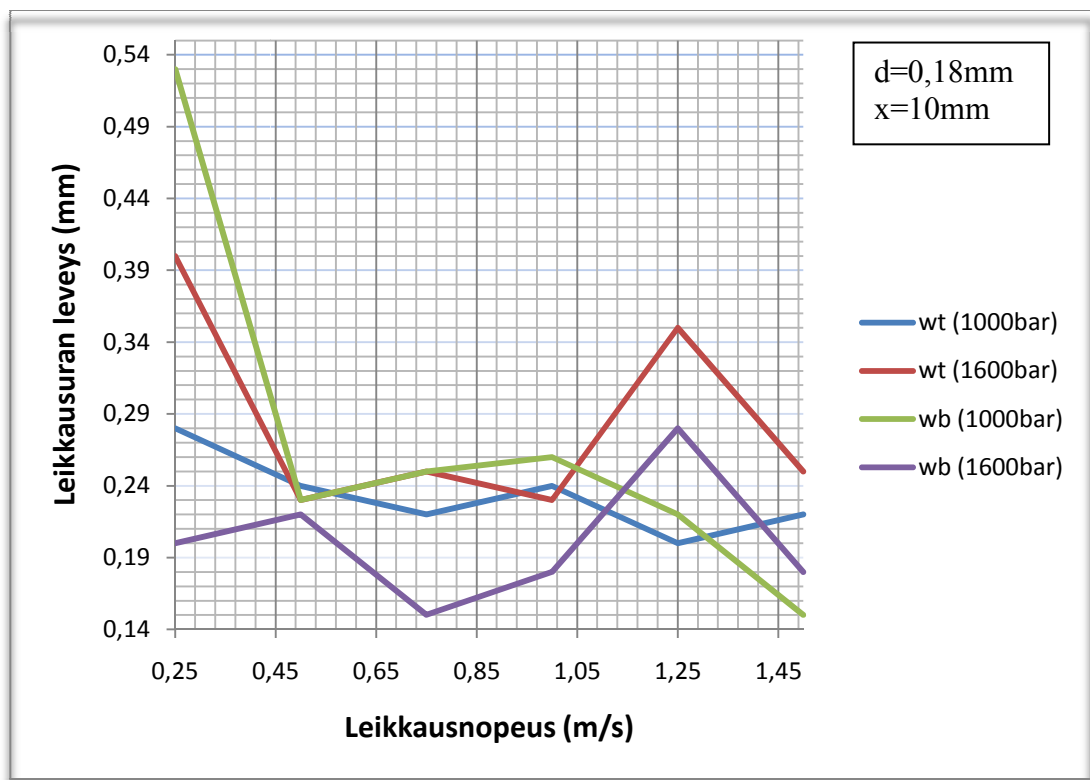
Leikattavan paperin ollessa nyt kaksi kertaa vahvempaa verrattuna aikaisemman kappaleen (luku 6.2. Paperin 112 g/m^2 leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysoiminen) tilanteeseen, on myös saadut leikkausurien leikkaustulokset lähempänä toisiaan. Leikattaessa neliömassaltaan 224 g/m^2 paperia, huomataan kuvista 6.20, 6.22, 6.24 ja 6.26, että leikkausurien ylemmän ja alemman osan leveydet seuraavat toisiaan huomattavasti säännöllisemmin. Tämä tulee esille erittäin pienestä vaihtelusta leikkausurien kaltevuuksien kulmissa. Tämä selittyy materiaalin paksuudella ja materiaalin laadun tasaisuudella. Materiaalin ollessa paksua ja tasalaatuista, ei siinä ilmene ylimääräisiä leikkaamisesta johtuvia repeämiä.

6.4. Aaltopahvin leikkaamisesta saadut tulokset ja niiden analysointi

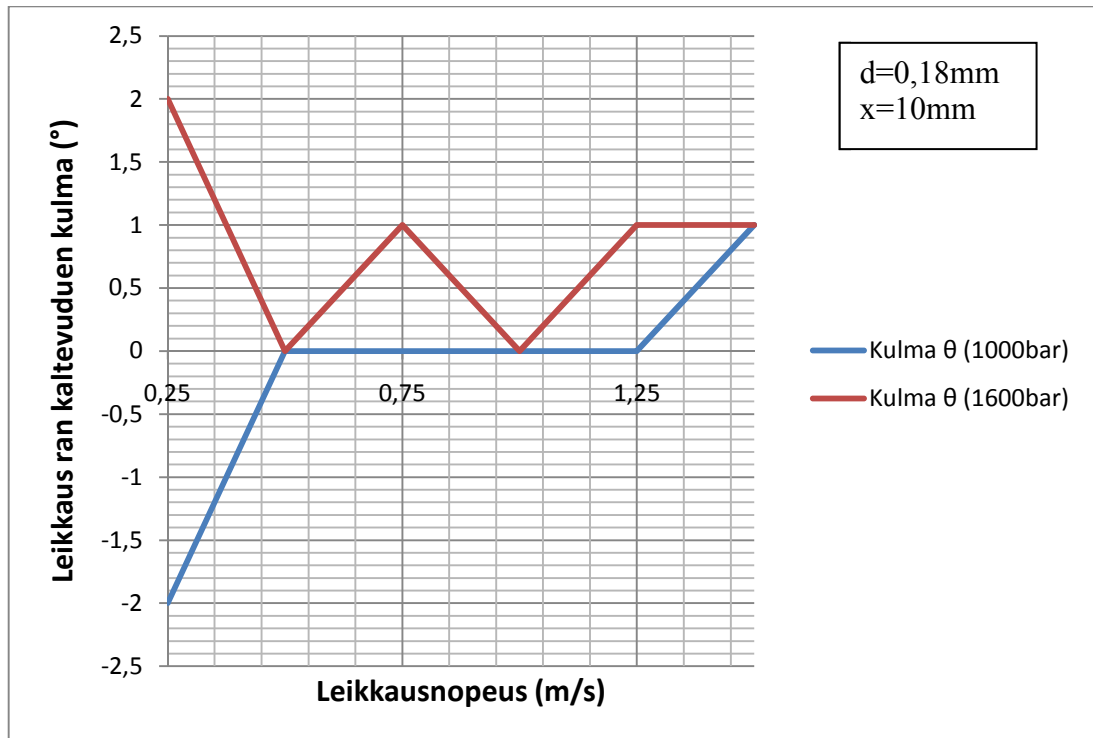
Tämän kappaleen kuvissa 6.27-6.33 on esitelty leikkaukskoikeissa saatuja mittaustuloksia. Kuvaajat esittelevät aaltopahvin leikkaamisesta saatuja tuloksia. Kuvissa esitellään tuloksia, jotka saadaan muuttamalla leikkauspainetta, -etäisyyttä ja suuttimen halkaisijan kokoa. Kuvat esittelevät kokonaisuudessaan tulokset, jotka saadaan aikaan valittujen leikkausparametrien arvojen kaikilla eri kombinaatio vaihtoehdoilla.

Kuvista 6.27 ja 6.29 nähdään miten leikkauspaineen muuttaminen vaikuttaa vesisuihkuleikkauksella aikaan saatuun leikkausjälkeen, kun leikattavana materiaalina on aaltopahvi. Käytettäessä pientä leikkauspainetta on leikkausuran alemman- ja

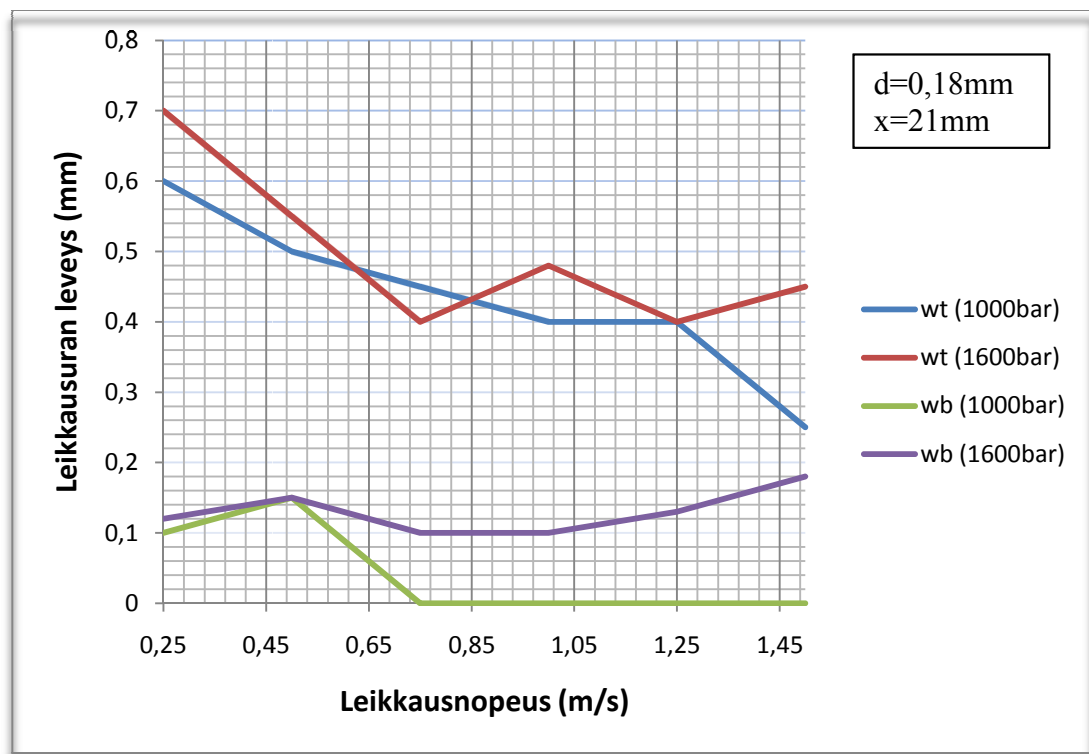
ylemmän osan leveydet lähes samaa kokoluokkaa. Tämä johtuu kahdesta tekijästä, joista toinen liittyy aaltopahvin kerrosmaiseen rakenteeseen. Aaltopahvin sisällä olevat kerrokset kuluttavat vesisuihkun ulompien osien tehoa siten, että vain vesisuihkun keskus läpäisee materiaalin. Vesisuihkun keskiakselilla dynaamisen paineen arvo on suurempi, jonka takia tämä osa vesisuihkusta lävistää materiaalin tehokkaammin. Uran tasareunaisuuteen liittyvä toinen tekijöistä on aaltopahvin moninkertainen paksuus verrattuna aikaisemmissa kappaleissa (luvut 6.1., 6.2. ja 6.3.) läpi käytyihin leikattavaksi valittuihin paperivaihtoehtoihin. Vesisuihku hajoaa kulkiessaan aaltopahvin säännöllisen rakenteen läpi. Tässä tilanteessa leikkausuran alemman osan leveys on lähempänä ylemmän osan leveyttä. Kuvassa 6.27 esitellyssä leikkaustilanteessa on saatu 1000 barin leikkauspaineella paikoitellen aikaan A-mallinen leikkausprofiili. Kuvasta 6.28 nähdään, että A-mallisen leikkausuran kaltevuuden kulma on alle nolla astetta, eli miinusmerkkinen.



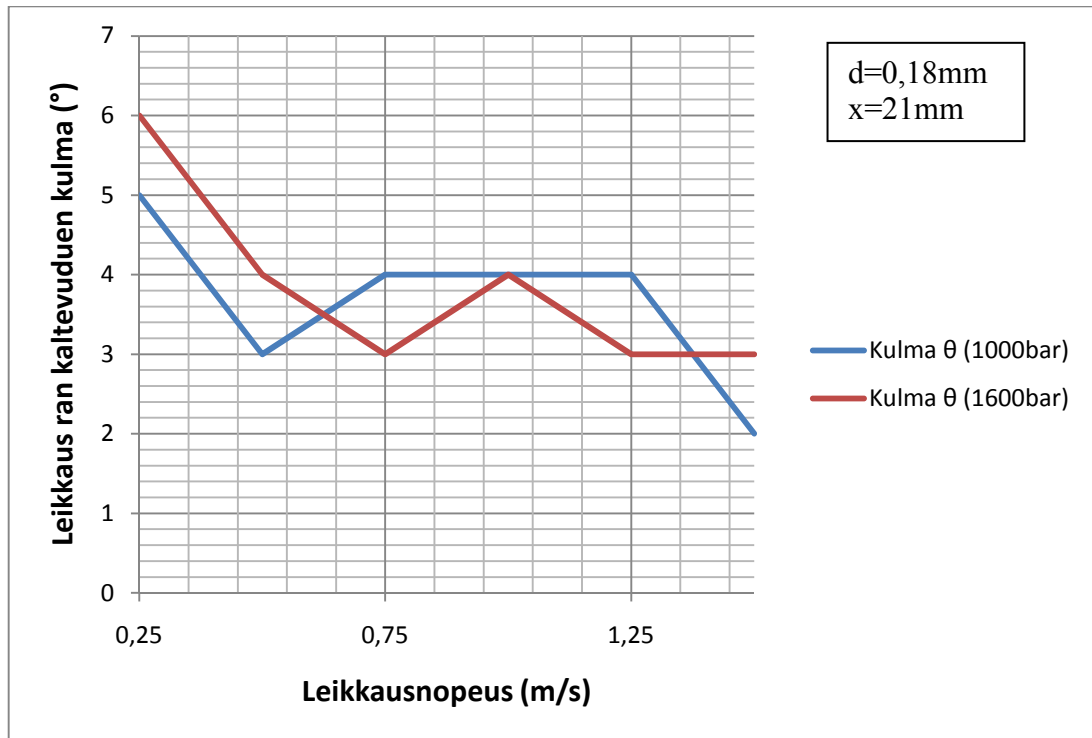
Kuva 6.27. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



Kuva 6.28. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



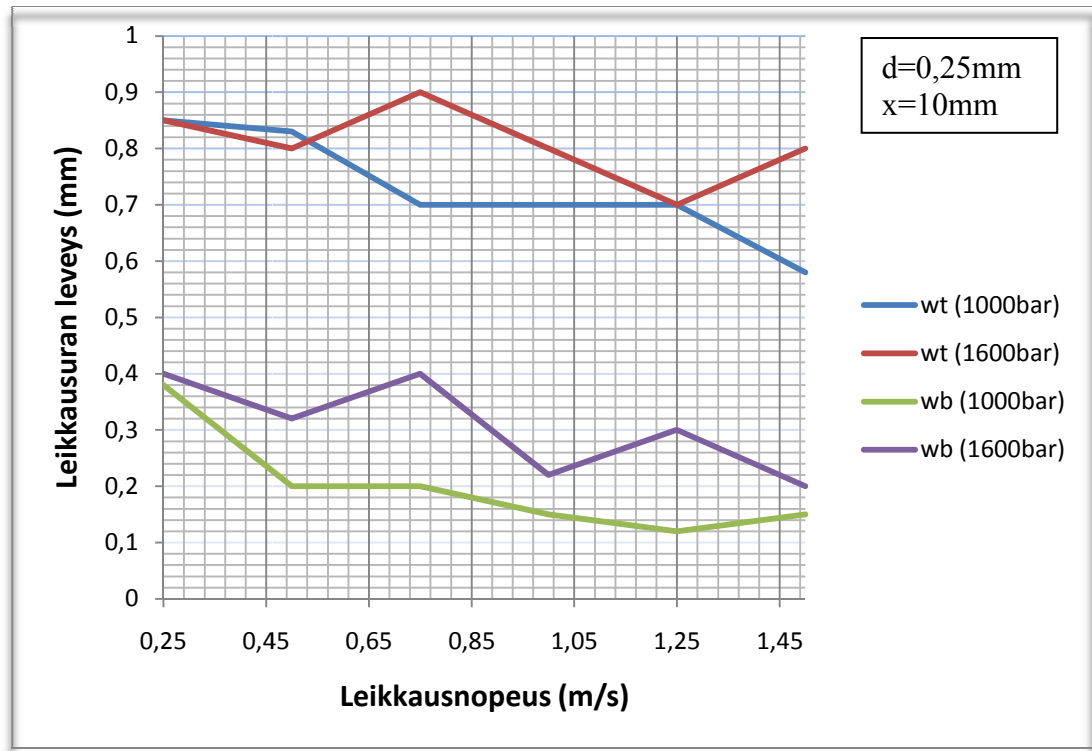
Kuva 6.29. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



Kuva 6.30. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Kuvassa 6.29 nähdään kuinka leikkausetäisyyden muutos on vaikuttanut leikkausuraan. Leikkausetäisyyden kaksinkertaistamisen jälkeen ei vesisuihkulla ole enää pystytty leikkaamaan aaltopahvin läpi asti ulottuvaa leikkausuraa. Tilanteessa vesisuihkulla on vain paikoitellen pystytty katkaisemaan aaltopahvi. Tämän takia aaltopahvi on jäänyt osittain sen alimmasta kerroksesta kiinni ja edelleen säilynyt yhtenä kappaleena. Aaltopahvin kolmikerroksinen rakenne on paikoitellen liian vahva 1000 barin leikkauspaineella muodostettavalla vesisuihkulla leikattavaksi. Kuvista 6.27, 6.31, 6.33 nähdään, että kaikilla muilla leikkauspaineilla, -nopeuksilla, -etäisyyksillä ja kahdella eri suutin kokoa käyttämällä muodostetaan aaltopahvin läpi asti ulottuvat leikkausurat.

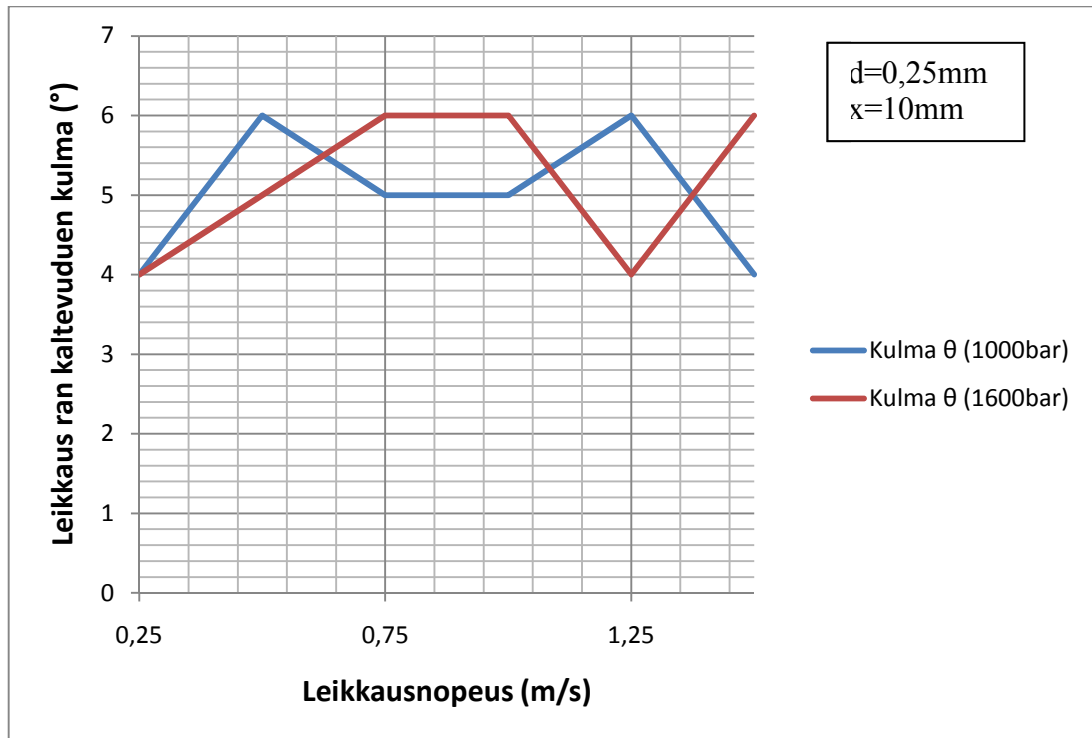
Suhteellisen pienillä leikkausparametrien arvoilla saadaan aikaan tehokas ja leikkaava vesisuihku, sillä ainoastaan aaltopahvia leikattaessa ei onnistuttu kaikilla leikkausparametrien kombinaatioilla koemateriaalia lävistämään. Kaikissa muissa leikkauskokeissa materiaalit lävistettiin ongelmitta. Kokeisiin valittujen materiaalien avulla ei tämän takia pystytä tarkastelemaan vesisuihkuleikattaessa muodostettujen leikkausurien vaihtelevia syvyyksiä. Vesisuihkuleikkauksen tehon vaikutusta leikkausuran syvyyteen ei voida tämän takia analysoida.



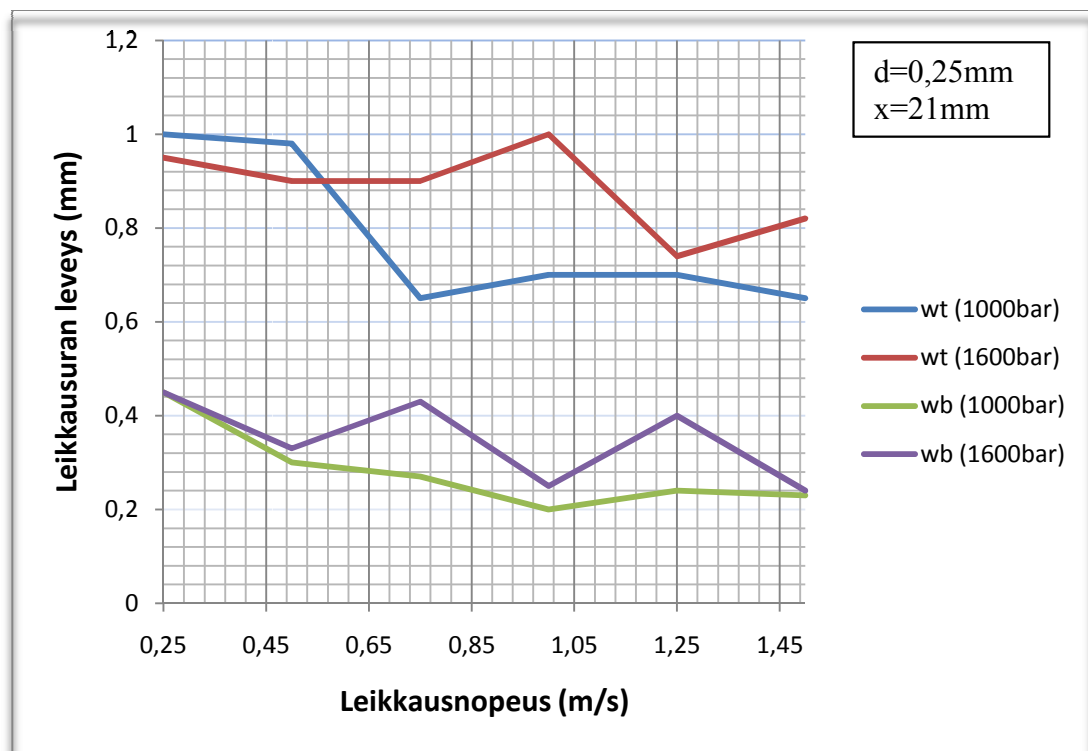
Kuva 6.31. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Halkaisijaltaan suuremmalla suuttimella leikattaessa saadaan aikaan tehokkaampi vesisuihku, joka muodostaa leveämpää leikkausuraa. Tilanteissa, joissa leikataan leikkauskokeissa käytetyistä materiaaleista vahvinta eli aaltopahvia, on muodostuva leikkausuran alempi osa leveämpikuin aikaisemmissa leikkauskokeissa. Tämä johtuu pahvin kovemmasta koostumuksesta kokeissa käytettyihin papereihin verrattaessa. Aaltopahvi pystyy säilyttämään muotonsa paremmin sitä leikattaessa verrattaessa aaltopahvia aikaisempien kappaleiden leikkaustilanteisiin, joissa materiaalina oli ohuempi materiaali eli paperi. Vesisuihku pystyy kuluttamaan leikkausuran alemmaa osaa leveämmäksi sillä aaltopahvi ei taivu sitä halkaistaessa vesisuihkulla. Kuvista 6.31 ja 6.33 voidaan nähdä miten suuremman suuttimen aikaansaama vesisuihku vaikuttaa muodostuvan leikkausuraan ja saa aikaan hiukan leveämmän leikkausuran kuin aikaisemmissa tilanteissa.

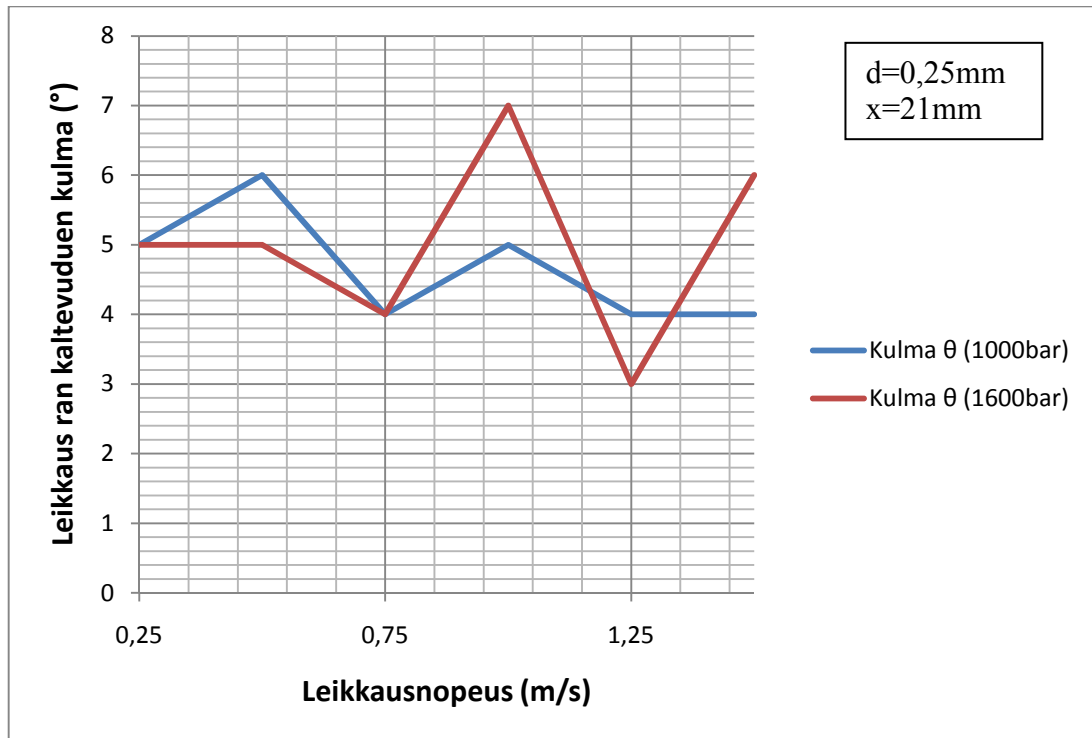
Suuremman halkaisijan suutinta ja suurempaa leikkausetäisyyttä käytettäessä ovat leikkausuran leveydet kasvaneet huomattavasti verrattuna pienemmän kokoluokan suuttimella aikaan saadun vesisuihkun muodostamaan leikkausjälkeen. Kuvasta 6.33 nähdään kuinka leveämmän halkaisijan suuttimella on muodostettu suurimmillaan 0,4 millimetrin levyinen leikkausuran alempi osa.



Kuva 6.32. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



Kuva 6.33. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.



Kuva 6.34. Leikkausurien leveydet leikattaessa aaltopahvia leikkauspaineilla 1000 baria ja 1600 baria.

Leikkausuran kaltevuuden kulmat ovat erittäin pieniä eri leikkaustilanteissa kuten kuvista 6.28, 6.30, 6.32 ja 6.34 voidaan nähdä. Leikattaessa paksua materiaalia kuten aaltopahvia, on leikkausuran ylemmän ja alemman osan leveydet lähellä toisiaan. Kaltevuuksien kulmien eroon vaikuttavat eniten koemateriaalien vaihtelevat paksuudet. Leikkausuran kaltevuuden kulman kasvaminen johtuu trigonometriasta. Kaltevuuden kulma pienenee huomattavasti tilanteessa, jossa kulman viereinen sivu kasvaa vastaisen sivun pysyessä lähes samankokoisena.

7. VESISUIHKUN HAJOAMINEN JA ENERGIATIHEYYS

Vesisuihkun hajoamisen ja tehon välisen suhteen tutkiminen on oleellista, koska näiden asioiden välinen yhteys auttaa ymmärtämään, kuinka vesisuihkun hajoaminen vaikuttaa sen energiatheyteen eli tehon suuruuteen tiettyä pinta-alaa kohti. Leikkausetäisyydellä tarkoitetaan etäisyyttä leikkauspäässä olevan suuttimen ja leikattavan materiaalin välillä. Leikkausetäisyyttä kasvattaessa vesisuihkun hajonta kasvaa.

7.1. Tehon tarkasteleminen

Vesisuihkun tehoa tutkitaan tarkastelualueella, joka on johdettu aikaisemmissa kappaleissa (luvut 2.4. ja 2.5.) esitellyistä teorioista. Työn alkupuolella (luku 2.5. Vesisuihkun hajoaminen ja energiatheys) esitelty teoria osoittaa alueen, jolla vesisuihkun nopeus pysyy lähellä vakiota. Toinen teorioista osoittaa alueen, jolla vesisuihkun dynaaminen paine pysyy lähes vakiona. Tämä teoria on esitelty alkupuolen kappaleessa (luku 2.4. Vesisuihkun ominaisuudet). Näiden kahden teorian osoittama päällekkäinen alue toimii vesisuihkun tehon tarkastelemisen alueena.

Vesisuihkun tehon tarkastelemisen aluetta määritettäessä voidaan Daviesin ja Jacksonin (1981) tutkimuksien mukaan laskea etäisyys, jonka jälkeen vesisuihkun dynaaminen paine laskee jyrkästi. Tämä dynaamisen paineen alue, missä dynaamisen paineen arvo on lähes vakio, määrää puoliksi energiatheyden tarkastelu alueen. Daviesin ja Jacksonin (1981) tutkimuksien mukaan tulee vesisuihkun leikkausetäisyyden olla alle 25 millimetriä, jotta saavutetaan hyvä leikkausteho. Tämä saadaan kertomalla vesisuihkussa käytetyn suuttimen halkaisija kertoimella 100.

Neusen et al. (1994) tutkimuksien perusteella voidaan määrittää energiatheyden tarkastelualueelle toinen raja. Neusen et al. (1994) tutkimuksien perusteella saatujen tuloksien mukaan käytettäessä 0,25 millimetriä halkaisijaltaan olevaa suutinta on aikaansaadun vesisuihkun nopeus vakio välillä 12-31,25 millimetriä. Nämä kaksi leikkausetäisyyttä saadaan kertomalla vesisuihkun aikaansaaman suuttimen halkaisija kertoimilla 48 ja 125. Käytetyn leikkauspään suuttimelle ei ole olemassa purkauserrointia, joten sille ei pystytä laskemaan vesisuihkun nopeuden todellista suuruutta. Kaavan (7) mukaan vesisuihkun nopeudelle voidaan laskea maksimi-arvo suuttimen kautta kulkevan tilavuusvirran avulla ja käyttää laskettua arvoa apuna tehon ja energiatheyden tarkkaan määrittämiseen.

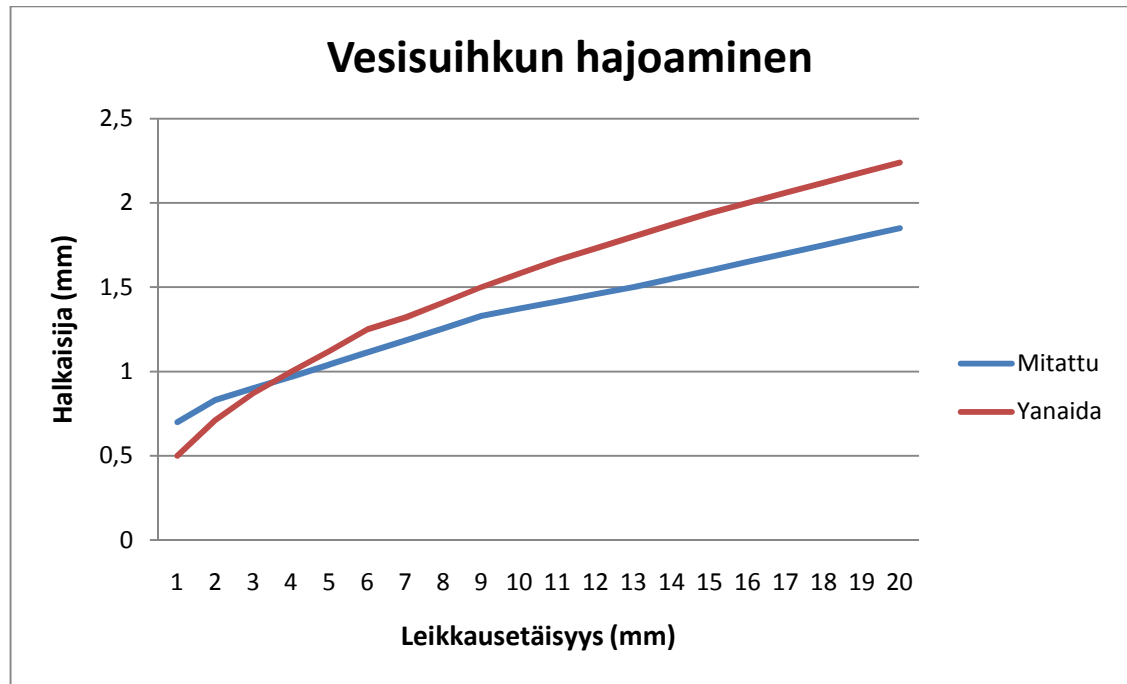
Energiatheyden tarkastelualueen lopullinen raja on siis päällekkäinen alue, jossa dynaamisen paineen sekä vesisuihkun nopeus ovat lähellä vakioita. Näiden perusteluiden mukaan oleellinen tarkastelemisalue määräytyy leikkausetäisyyksillä, jotka ovat välillä 12-25 millimetriä. Seuraavan kappaleen kuvaajiin 7.1 ja 7.2, joissa

vesisuihkun hajoamista ja energiatheyttä tarkastellaan, otetaan kuitenkin huomioon myös alue, jolla leikkausetäisyys on pienempi kuin 12 millimetriä. Kyseistä aluetta voidaan tarkastella, sillä vesisuihkun dynaamisen paineen sekä nopeuden suuruus eivät voi olla laskettuja arvoja pienempiä tällä alueella.

Vesisuihkun säännöllinen hajoaminen todettiin laboratoriossa sijaitsevalla vesisuihkuleikkurilla. Laboratoriossa osoitettiin leikkauspään suuttimen halkaisijan koon ja leikkausetäisyyden välinen suhde leikkaamalla vesisuihkulla paperia eri leikkausetäisyyksillä. Leikkaukset suoritettiin aikaisemmassa kappaleessa (luku 5.5. Vesisuihkun energiatheyden mittaaminen) kuvaillulla tavalla ja niiden mukaan piirrettiin kuvaaja 7.1. Kyseisen kuvaajan avulla osoitetaan Yanaidan (1974) kehittäämä laskutapa leikkausetäisyyden, suuttimen halkaisijan koon ja vesisuihkun hajoamisen arvojen välille.

Kuvasta 7.1 ilmenee, kuinka vesisuihkun halkaisija kasvaa siirryttäessä kauemmaksi leikkauspään suuttimelta. Mitatut arvot esittävät laboratoriossa saatuja tuloksia. Yanaidan (1974) käyrä on laskettu olettamalla, että vesisuihkun halkaisija on verrannollinen kuljetun matkan neliöjuureen tarkasteltaessa tilannetta vesisuihkun kulkusuunnassa. Kuva 7.1 esittää tulokset koetilanteesta, jossa käytettiin suutinta, jonka halkaisija oli 0,25 millimetriä. Mitattuja arvoja kuvassa 7.1 on neljä kappaletta etäisyyksillä 2mm, 9mm, 13mm ja 19mm. Mitattujen pisteiden kautta on piirretty käyrä, joka esittää vesisuihkun leviämistä laboratorio olosuhteissa saatujen tuloksien mukaan.

Seuraavalla sivulla olevan kuvan 7.1 kaksi käyrää on hyvin samantyyppisiä muodoltaan ja kokoluokaltaan. Niiden välisenä erona on mitatuilla tuloksilla saadun käyrän laskeminen riippuen siitä kuinka kauaksi suuttimelta pois päin, eli x-akselin suuntaisesti liikutaan. Mitä enemmän leikkausetäisyyttä kasvatetaan, sitä vähemmän materiaalia leikkaava halkaisija kasvaa, verrattuna Yanaidan-käyrän osoittamiin pinta-alojen suuruuksiin. Laboratoriossa mittaamalla saadun käyrän loivempi muoto johtuu osittain mittaustavasta, jolla vesisuihkun halkaisijan hajoamisesta kertovat arvot laskettiin. Paperiin leikatut aukot eivät kuvaa täysin vesisuihkun hajoamista. Paperiin muodostuva aukko ei ole sama kuin vesisuihkun halkaisija, millä muodostetaan leikkaavaa jälkeä. Paperi saattaa leikkauksen aikana kostuessaan taipua pois päin vesisuihkusta. Tämän jälkeen kuivuessaan ja kovettuessaan paperi saattaa palautua lähemmäksi alkuperäistä muotoaan, jonka ansiosta siihen syntyvän vesisuihkulla leikattavan reiän halkaisijan koko saattaa muuttua. Paperissa olevan aukon leikatun reunan takaisintaipuminen voi tarkoittaa muutamien kymmenien mikrometrien muutosta sen halkaisijan koossa.

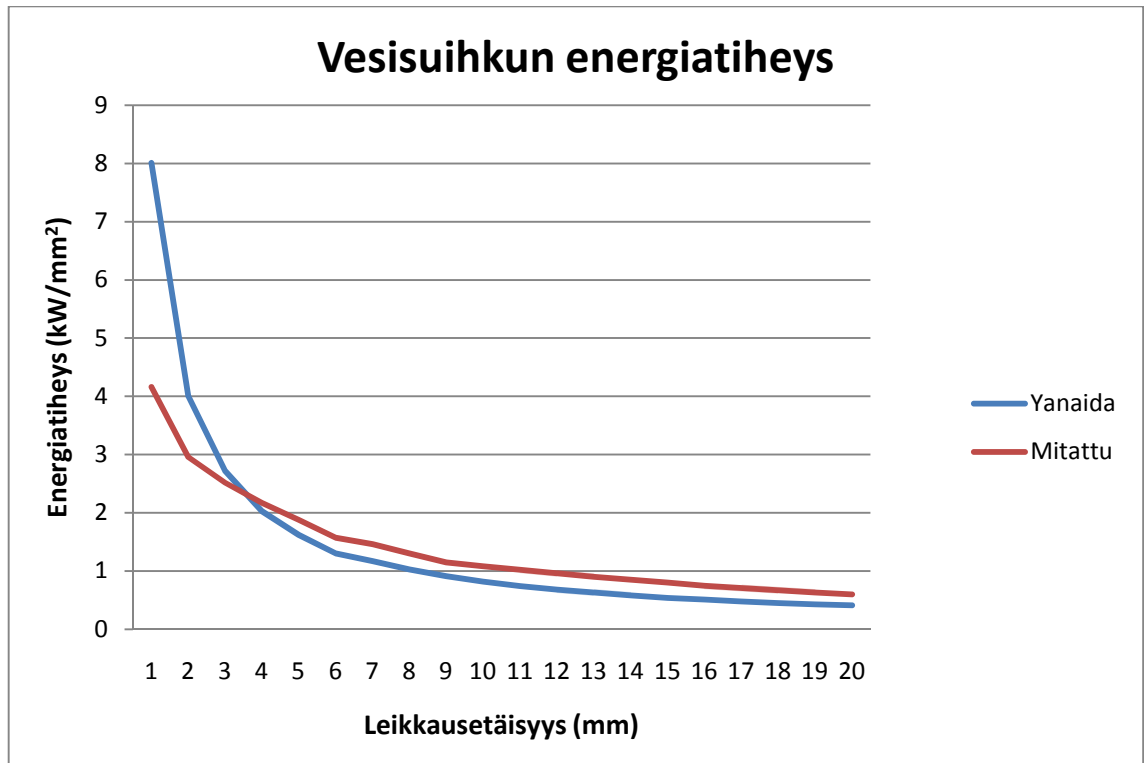


Kuva 7.1. Vesisuihkun laajeneminen Yanaidan mukaan ja mitattuna.

Leikkauskokeissa tehtyjen, samoilla leikkausetäisyyksillä muodostettujen aukkojen halkaisijoissa oli yllättävän suuria eroja. Paperin palautuminen kuivuessaan on yksi syy halkaisijoiden kokoeroihin. Muita syitä leikattujen aukkojen vaihteleville halkaisijoiden suuruuksille voi olla leikkausmateriaalin laadun epätasaisuus ja paineenmuuntimen aikaansaamat leikkauspaineen vaihtelut.

Vesisuihkun energiavirran muodostaa leikkauspäästä tulevan veden massavirta. Energiavirran kaava (5) on esitelty aikaisemmin tekstissä (luku 2.5. Vesisuihkun hajoaminen ja energiatiheys) ja sillä lasketaan kineettinen energia sekuntia kohti. Aiemmin vesisuihkun nopeus todettiin olevan lähellä vakiota tietyillä leikkausetäisyyksillä, joten tällä alueella myös vesisuihkun kineettinen energia pysyy lähellä vakiota.

Vesisuihkun maksimi virtausnopeus lasketaan kaavalla (6). Maksimi virtausnopeus laskettiin suoraan leikkauspäässä kulkevasta tilavuusvirrasta. Kaavalla (4) lasketun tehon arvon sekä Yanaidan teorian mukaan laskettujen, että vesisuihkun hajoamisesta mitattujen arvojen avulla määritetään vesisuihkun energiatiheys eri leikkausetäisyyksillä. Lasketut energiantiheyden arvot ovat esitelty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa.



Kuva 7.2 Vesisuihkun energiatiheysten muuttuminen leikkausetäisyyttä kasvatettaessa (oletetaan tehon jakautuvan tasaisesti vesisuihkun leikkaavan ja kasvavan pinta-alan suhteen).

Energiatiheyden laskemiseksi on käytetty pinta-alaa, mikä saatiin määritettyä vesisuihkulle Yanaidan teorian mukaan sekä laboratoriossa tehtyjen vesisuihkun hajontamittausten avulla. Yanaidan teorian mukaan lasketussa vesisuihkun energiatiheudessa on suurempia eroja verrattessa laboratoriossa mitattuihin tuloksiin. Nämä suuremmat erot näkyvät kuvassa 7.2 esiintyvien kuvaajien alkupään ja loppupään alueilla. Kuvaa 7.2 tarkasteltaessa nähdään, että vesisuihkulla leikattaessa on tärkeää pitää leikkausetäisyys mahdollisimman pienenä, sillä sen antama energiatiheys heikkenee nopeasti leikkausetäisyyden kasvaessa. Kuten kuvassa 7.2 nähdään, saadaan laboratoriossa olevalla vesisuihkulla aikaan tasatehoisempi vesisuihku tilanteessa, missä vertailukohteena on Yanaidan teoriaan perustuvat tulokset. Laboratorion leikkauspöydän leikkauspäässä käytetyn suuttimen avulla tuotetaan leikkaustilanteessa vesisuihku, jonka energiatiheys on tasaisemmin jakautunut.

7.2. Leikkausuran aaltomaisuus ja materiaalin kastuminen

Aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.3. Leikkausuravaihtoehdot) esiteltiin kuvassa 2.2 vesisuihkulla aikaansaatu leikkausuran profiili. Leikattaessa eri neliömassaisia paperilaatuja (tuloksia esitelty edellisissä kappaleissa, luvut 6.1., 6.2. ja 6.3.), ei pystytty analysoimaan leikkausuran seinämän laatua. Leikkausmateriaalin ohuudesta

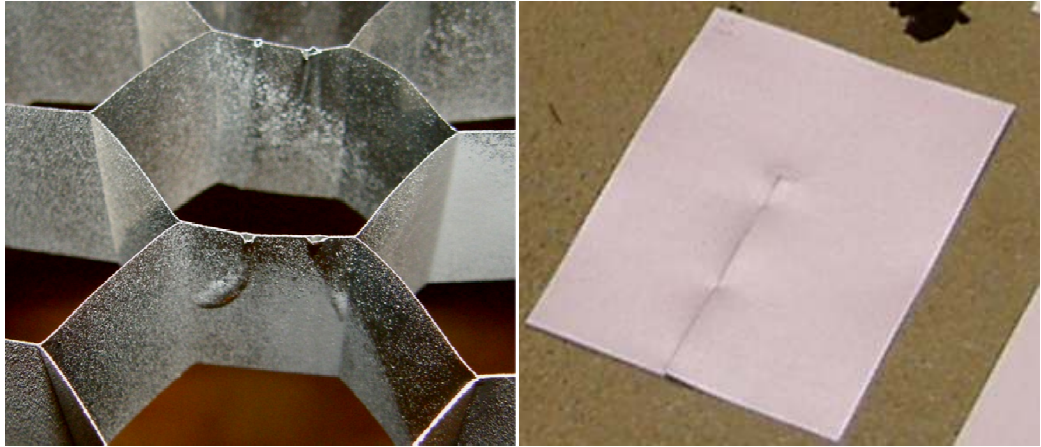
johtuen ei kyetty osoittamaan, että esimerkiksi pelkällä vedellä vesisuihkuleikattaessa leikkausuran kylkeen muodostuisi aaltomainen alue.

Laboratoriossa aaltomaisen alueen muodostuminen osoitettiin leikkaamalla 18 millimetrin paksuista puhelinluetteloa. Leikkauksessa käytettiin myös 0,25 millimetriä halkaisijaltaan olevaa suutinta ja leikkausnopeutta 0,01 m/s. Puhelinluettelo asetettiin leikkaustasolle, jonka etäisyys oli 21 millimetriä leikkaussuuttimen päästä. Kuvassa 7.3 nähdään muodostetun leikkausuran toinen seinämä, josta aaltomainen pinta voidaan havaita.



Kuva 7.3. Läpileikattu puhelinluettelo

Kuvasta 7.3 voidaan havaita aaltokuvion voimistuminen, kun liikutaan leikkausuran ylemmästä osasta kohti sen alempaa osaa. Leikkauspinnan alalaidasta aaltokuvio on myös taipunut hieman leikkaussuunnan vastakkaiseen suuntaan eli "taaksepäin." Taivutuksesta johtuvaa viivettä esiteltiin aikaisemmassa kappaleessa (luku 2.3. Leikkausuravaihtoehdot). Puhelinluetteloa leikattaessa suuremmalla leikkausnopeudella havaittiin puhelinluettelon lämpeneminen. Vesisuihku pitää leikattavan materiaalin viileänä ainoastaan tilanteissa, joissa vesisuihku virtaa materiaalin läpi. Tällä läpivirtaavalla nesteellä samanaikaisesti jäähdytetään kappaletta sitä leikattaessa. Tässä tilanteessa puhelinluetteloa ei kokonaan halkaistu, josta johtui lämpötilan nouseminen. Vesisuihku ei jäähdyttänyt uraa, sillä leikkausnesteen liike-energia siirtyi kitkasta johtuen leikatun puhelinluettelon lämpöenergiaksi.



Kuva 4.5. Vesisuihkun leikkaustasoon aikaansaamia vaurioita ja roiskeita koepalassa.

Kuvan 7.4 vasemmalla puolella nähdään vesisuihkulla vaurioitettu leikkaustaso. Leikkaustasossa käytettävän oikean materiaalin valinta on hankala. Kuten kuvassa 7.4 nähdään, on vesisuihkulla leikattaessa tunkeuduttu leikkaustason muodostavan alumiinilevyn kerrosten väliin. Kuvan 4.7 oikealla puolella nähdään vesisuihkuleikkauksessa kastunut paperinen koepala. Tästä kuvasta nähdään, kuinka leikkaustasosta aiheutuva takaisinroiskuminen on kastellut leikattavaa koepalaa. Kostumista on tapahtunut materiaaliin eniten juuri ritilässä olevien levyjen kohdilta.

8. PÄÄTELMÄT

Vaihtelemalla työhön valittuja leikkausparametreja kuten leikkauspainetta, -etäisyyttä, -nopeutta ja suuttimen halkaisijan kokoa saadaan aikaan leikkausuraan muutoksia. Tästä voidaan johtaa lukuisia kausaalipäätelmiä. Seuraavissa kappaleissa tuodaan esille tutkimustulokset koskien pehmeiden materiaalien vesisuihkuleikkaamista sekä leikkausetäisyyden merkitystä leikkaustapahtumassa. Kappaleissa pohditaan myös sitä, oliko diplomityössä tehty tutkimus onnistunutta. Lisäksi annetaan kehitysehdotuksia mahdollisen jatkotutkimuksen varalle.

8.1 Pehmeiden materiaalien vesisuihkuleikkaaminen

Tämän diplomityön päätarkoitus oli tutkia leikkausparametrien vaikutusta pehmeiden materiaalien vesisuihkuleikkaamisessa. Tätä tutkittiin valitsemalla olennaiset leikkausparametrit vesisuihkuleikkurille sekä leikattavat materiaalit, joita vesisuihkuleikkaamalla saatiin aikaan oleellista ja informatiivista mittaustietoa. Leikkausparametreina toimivat leikkauspaine, -etäisyys, -nopeus ja suuttimen halkaisijan koko, joille kullekin (leikkausnopeutta lukuun ottamatta) valittiin kaksi arvoa. Leikkausnopeudelle valittiin kuusi eri vakionopeutta. Leikattavia pehmeitä materiaaleja oli yhteensä neljä: kolme oli eri vahvuisia paperilaatuja ja neljäs aaltopahvia. Jokaista materiaalia varten suoritettiin samat leikkauskokeet, joissa käytettiin leikkausparametrien kaikkia mahdollisia kombinaatioita.

Tutkimuksen alkupuolella esiteltiin vesisuihkuleikkaamiseen liittyvää teoriaa, josta tässä työssä sovellettiin eniten läpileikattua leikkausuraa kuvaavaa leikkausuran profiilimallia. Tässä leikkausuran profiilimallissa esiteltiin siihen liittyvät olennaiset parametrit, joiden perusteella työssä tutkittiin leikkauskokeissa aikaansaattua leikkausuraa. Leikkausuran parametrit ovat leikkausuran ylemmän- ja alemman osan leveys sekä leikkausuran kaltevuuden kulma. Leikatuista materiaaleista mikroskoopin avulla saatuja mittaustuloksia tutkittiin työn alkupuolella esitellyn teoriaosuuden antamien työkalujen avulla. Lopulta valittujen tutkimusmenetelmien avulla pystyttiin saaduista mittaustuloksista näkemään syy-seuraussuhteet leikkausparametrien muutoksilla aikaansaaduille ilmiöille leikkausjäljessä.

Erilaisten leikkausparametrien muutosten vaikutus saatiin selville tutkimustuloksista. Vaikka leikattavat pehmeät materiaalit poikkesivat toisistaan niiden neliömassan ja paksuuden osalta, oli leikkauskokeilla aikaansaaduissa tuloksissa havaittavissa samoja ja keskenään vertailtavissa olevia ilmiöitä.

Leikkaustilanteessa leikkauspainetta kasvatettaessa saatiin kunkin materiaalin kohdalla leveämpi leikkausura. Leikkausuran leveyden kasvaminen leikkauspainetta

nostettaessa oli aina voimakkaampaa leikkausuran ylemmän osan leveydessä. Tämä leikkausuran laajeneminen todettiin johtuvaksi suuremmasta vesisuihkun tehosta, joka johtui dynaamisen paineen kasvusta. Vesisuihkun halkaisija ei kasva leikkauspainetta lisättäessä. Onkin huomioitavaa, että vesisuihkun sisältämä energiatiheys on tässä tilanteessa suurempi. Energiatiheydestä kerrotaan enemmän seuraavassa luvussa.

Leikkausetäisyyttä kasvatettaessa saatiin aikaan niin ikään leveämpi leikkausura. Leikkauskokeissa käytetyn vesisuihkun halkaisija kasvoi vesisuihkun lähestyessä leikattavaa materiaalia. Mitä suurempi leikkaavan vesisuihkun halkaisija oli, sitä leveämmän leikkausuran se pystyi leikkauskokeissa muodostamaan.

Kolmannen parametrin eli leikkausnopeuden kasvattamisella pystyttiin leikkausuran leveyttä pienentämään. Leikattavan materiaalin ollessa niin sanotusti pehmeää materiaalia on sen rakenne heikohko ja tämän takia myös vesisuihkun helposti läpäistävissä. Leikkausnopeutta kasvatettaessa pystytään vesisuihkun avulla yhä lävistämään materiaali. Suuremman nopeutensa ansiosta vesisuihkulla vaikutetaan leikattavaan materiaaliin vähemmän aikaa. Suuremmalla leikkausnopeudella leikattaessa vahinkoa leikattavaan pintaan syntyy tällöin vähemmän.

Leikkaustilanteisiin liittyvä viimeinen leikkausparametri oli vesisuihkun muodostavan suuttimen halkaisijan koko. Leikkauspäässä olevan suuttimen halkaisijan koolla on suuri vaikutus leikkausuran leveyteen. Suuttimen halkaisijaa kasvatettaessa, saadaan leikkaavalle vesisuihkulle aikaan suurempi kineettinen energia ja teho. Tämä johtuu suuttimen läpi kulkevasta aikaisempaan tilanteeseen nähden suuremmasta massavirrasta. Suuttimen halkaisija määrää vesisuihkun halkaisijan koon leikkauspään kohdalla ja täten myös vesisuihkun antaman energiatihedden. Suuttimen koon suurentaminen tarkoittaa tehon ja leikkaavan pinta-alueen kasvamista ja tätä kautta myös suuremman leikkausuran muodostumista.

Leikkausuran tutkimiseen liittyvissä leikkauskokeissa suoritettiin yhteensä 128 erilaista leikkausta, joissa käytettiin leikkausparametrien erilaisia kombinaatioita ja neljää eri leikkausmateriaalia. Ainostaan neljällä erilaisella leikkausparametrien yhdistelmällä leikattavaksi valittua pehmeää materiaalia ei saatu läpileikattua. Nämä kyseiset neljä leikkausta liittyivät aaltopahvin leikkaamiseen matalalla leikkauspaineella, pienellä suuttimen halkaisijan koolla, suurella leikkausetäisyydellä ja suurimmilla leikkausnopeuksilla. Kaikissa muissa leikkauskokeissa vesisuihku lävisti leikattavaksi valitun materiaalin. Tämän vuoksi tutkimuksessa ei onnistuttu tutkimaan kylliksi vesisuihkun läpäisevyyttä, sillä suurin osa materiaaleista *läpileikattiin* valituilla parametrien arvoilla. Tuleviin leikkauskokeisiin voitaisiin näiden tuloksien perusteella valita haastavampia materiaaleja leikattavaksi vielä kriittisempien leikkausparametrien arvojen löytämiseksi.

Leikkauspöydässä käytetyn leikkaustason avulla ei kyetty tukemaan leikattavia paperilaatuja tarpeeksi leikkaustason kennomaisen rakenteen vuoksi. Leikattavan paperin ollessa taipuisaa (kuten tavanomainen kopiopaperi) ei leikkausura muodostu täysin virheettömäksi tilanteessa, jossa paperi ei ole tuettu riittävän tasaisesti leikkausuran kohdalta.

Työssä onnistuttiin tutkimaan paperin läpi leikattua leikkausuraa ja tämän perusteella ymmärtämään leikkausparametrien vaikutusta leikkaustapahtumaan. Abrasiiveja hyödyntävä vesisuihkuleikkausteoria, jossa käsitellään leikkausuran muodostumista, osoittautui toimivaksi ja hyödylliseksi työkaluksi myös pelkällä vedellä tehtyjen leikkaustulosten analysoimiseen. Leikkauskokeiden avulla pystyttiin osoittamaan myös muita vesisuihkun leikkauksen jälkeensä jättämiä tuntomerkkejä kuten leikkausuran aaltomaisuus ja vesisuihkun pään taipumisesta johtuva viive.

8.2 Vesisuihkun energiatiheys

Leikkaustapahtumissa on oleellista kiinnittää huomiota vesisuihkun energiatiheuteen, mikä heikkenee huomattavasti leikkausetäisyyttä kasvatettaessa. Aikaisemmassa kappaleessa (luku 7.2. Teoreettisia ja mitattuja tuloksia) esitetyjen leikkauskokeissa saatujen tulosten avulla pystyttiin osoittamaan vesisuihkun säännöllinen leviäminen.

Vesisuihkun välttämättömän leviämisen seurauksena vesisuihkulla suoritettavat leikkaukset on tehtävä suihkun alkuvaihealueella ja mahdollisimman lähellä leikkauksen päässä olevaa suutinta. Siirryttäessä loitommalle vesisuihkun alkupisteestä (suutimesta) sen kulkusuunnan suuntaisesti huomataan, että vesisuihkun halkaisija on kasvanut ja alkuperäinen teho on jakaantunut laajemmalle leikkaukselle. Vesisuihkun energiatihedys pienentyminen tekee syvistä leikkauksista haastavia. Vesisuihkun halkaisijan kasvaminen aikaansaa syvistä leikkauksista epäsäännöllisiä ja A -mallisia. Aikaisemmassa kappaleessa (luku 7.2. Teoreettisia ja mitattuja tuloksia) tehdyt havainnot vesisuihkun energiatihedys muutoksesta leikkauksien etäisyyden kasvamisen suhteen osoittavat, että tärkeää tehokkaan leikkauksen aikaansaamiseksi on käyttää mahdollisimman pieniä leikkauksien etäisyyksiä.

Jatkotutkimuksissa olisi oleellista laskea käytetyille painevesisuihkuille tarkkoja dynaamisen paineen arvoja energiatihedys yksityiskohtaisemman tutkimisen mahdollistamiseksi. Tämän diplomityön puitteissa kyseisen asian tutkiminen olisi laajentanut tutkimusta liaksi. Lisäksi kyse oli resurssien vähäisyydestä. Tämänkaltaisen tutkimus olisi edellyttänyt painevesisuihkun alkuvaihealueen tarkan pituuden määrittämiseen.

LÄHTEET

Chen, W.L. ja Geskin, E.S. 1990. Measurement of the velocity of abrasive water jet by the use of laser transit anemometer, Proceedings of 10th International Symposium on the Jet cutting technology. Amsterdam, Netherlands. Elsevier Applied Science. s.23-36

Chen L., Siores, E. ja Wong. 1996. Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol 36(11). s.354-362.

Summers, A. 1995. Waterjetting Technology. First edition. Oxford, Great Britain by Alden Press. s. 882

Davies, T.W. ja Jackson, M.K. 1981. Optimum conditions for the hydraulic mining of china clay. Proceedings of the First U.S. Water Jet Conference. Golden, Colorado School of Mines Press. s.126-146

Dynaset. Hydraulic High Pressure Water Pumps [www]. [viitattu 04.05.2010]. Saatavissa: <http://www.dynaset.com/highpressurepumps.html>

Ehow. Lasik Vs. Lasek Surgery [www]. [viitattu 27.01.2010]. Saatavissa: http://www.ehow.com/about_5370996_lasik-vs-lasek-surgery.html

Fonselius J., Rinkinen J. ja Vilenius M. 1997. Hydrauliiikka II. Opetushallitus, 2.painos. Helsinki, Oy Edita AB. s.223

Hancox, N.L., ja Brunton, J.H. 1966. The Erosion Of Solids By The Repeated Impact Of Liquid Drops. Proceedings of the Royal Society London. Vol. 260A, ss 121-143

Hashish, M. 1984. On the modeling of abrasive-waterjet cutting. Proceedings of 7th international Symposium on Jet Cutting Technology. Ottawa, Canada, Bedford. BHR Group. s.249-265

Hashish, M. ja Du Plessis, M.P. 1979. Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to standoff distance and multipasses. Journal of Engineering for Industry, Vol 11. s.311-318

Hydro Pressure Corporation. Hydrodemolition [www]. [viitattu 08.09.2010]. saatavissa: <http://www.hydropressure.com/hydrodemo.html>

Kuleci, M.K. 2002. Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications. international Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 42(12). s.1297-1306

KMT. 2005. Water Jet Cutting - A Technology on the rise. [www]. [viitattu 05.08.2009]. Saatavissa:
http://www.kmtgroup.com/opencms/en_UK/waterjet_systems/resources/processes/downloads/KMT_technology_description_ENG.pdf

Kmtgroup. Pure Water Cutting Head Assembly [www]. [viitattu 27.01.2010]. Saatavissa:
http://www.kmtgroup.com/opencms/en_UK/waterjet_systems/resources/products_esa/downloads_esa/aqualine_eng.pdf

Kauranne, H., Kajaste, J. ja Vilenius, M. 1996. Hydraulitekniikan perusteet. Werner Söderström osakeyhtiö Porvoo, Helsinki, Juva WSOY/OPPIMATERIAALI. s.340

Kurkioja, M. 2007. Pituusleikkurin leikkaustapahtumat eri paperilajeilla ja laminaateilla. Tampereen ammattikorkakoulu. Paperitekniikan koulutusohjelma. Quatrol Oy. s.65

Liu, H. 2004. A Study of the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Contouring of Alumina Caramics and Associated Jet Dynamic Characteristics. Queensland University of Technology. School of Mechanical, Manufacturing and Medical engineering. s.250

Momber, A. W. and ja Kovacevic, R..1998. Principes of abrasive water jet machining. London. Springer.

NCBI, National Center for Biotechnology Information. Cutting the cornea with a waterjet keratome [www]. [viitattu 06.05.2009]. Saatavissa:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8963811>

Neusen, K.F., Gores, T.J. ja Amano, R.S. 1994. Axial variation of particle and drop velocities downstream from an abrasive water jet mixing tube, Proceedings 12th International Conference on Jet Cutting Technology. Rouen, France. Mechanical Engineering Publication Limited. s.93-103

Pihlainen, J. 2009. Vesisuihkulaitteen suunnittelu ja toteutus. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. s.79

Prolaser. Vesileikkaus [www]. [viitattu 27.01.2010]. Saatavissa:
<http://www.prolaser.fi/vesileikkaus.html>

Teskolaser. Standard metal cutting processes: laser cutting vs. water jet cutting [www]. Viitattu [12.03.2010]. Saatavissa: http://www.teskolaser.com/waterjet_cutting.html

The University of Nottingham, News and Reviews, European first in aerospace engineering [www]. [viitattu 06.05.2009]. saatavissa: <http://research.nottingham.ac.uk/NewsReviews/newsDisplay.aspx?id=301>

Ultracut. Tekniikka - vesileikkaus, vesisuihkuleikkaus [www]. [viitattu 26.05.2009]. Saatavissa: <http://www.ultracut.fi/index.php?tocID=5>

Wang, J. .2003. Abrasive Waterjet machining of engineering materials. Uetikon-Zuerich. Switzerland. Trans Tech Publications.

Wang, J. ja Liu, H. 2002. An analysis of the cutting performance in contouring using an abrasive waterjet. Chinese Journal of Mechanical Engineering(English Edition). Vol.15. s.73-78

Yanaida, K. 1974. Flow Characteristics of Water Jets. paper A2, 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology. Cambridge, UK. s.A2-19 - A2-32

Zeng, J. ja Munoz, J.P. 1994. Intelligent automation of AWJ cutting for efficient production. Proceedings 12th International Conference on Jet Cutting Technology. Rouen France. Mechanical Engineering publication Limited. s.401-408

Zimmerman, W, Boniz, R. ja Feldman, J. 2001. Cryobot: An ice Penetrating Robotic Vehicle for Mars and Europa. Jet Propulsion Lab. California inst. of Technol.,Pasadena, CA s.16